

Étude de mesures de qualité de préhensions sur le mannequin virtuel du logiciel de simulation Delmia de Dassault Systèmes

par

Quentin BOURRET

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 12 SEPTEMBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Quentin Bourret, 2017

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Rachid Aissaoui, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Mme Nicola Hagemeister, codirectrice de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. David Labbé, président du jury
Département de génie logiciel et des technologies de l'information à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Duchaine, membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 08 SEPTEMBRE 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à remercier mes directeurs et co-directeurs de mémoire, M. Rachid Aissaoui et Mme Nicola Hagemeister, pour m’avoir soutenue et guidé lors de ce mémoire.

Je remercie également Mr Pierre Olivier Lemieux pour ses grands soutiens et ses conseils judicieux.

Mes remerciements vont également à Laetitia de Polo, Arnaud Barré pour leur gentillesse et leur bonne humeur face à mes nombreuses questions.

Je tiens à remercier Julie Charland ainsi que Hugues Caron et David Brouillette pour leur accueil chaleureux à Dassault Systèmes ainsi que pour leur aide et leur appui.

Je tiens aussi et surtout à souligner ma profonde gratitude à l’ensemble de ces experts de très haut niveau pour la confiance qu’ils m’ont témoignée et l’appui dont j’ai pu bénéficier durant toute la durée de mon mémoire. Ils m’ont fait découvrir le monde de la recherche et ont accepté de partager avec moi l’ensemble des informations et des connaissances dont j’avais besoin. Je les remercie encore tout particulièrement pour la disponibilité dont ils ont fait preuve.

ÉTUDE DE MESURES DE QUALITÉ DE PRÉHENSIONS SUR LE MANNEQUIN VIRTUEL DU LOGICIEL DE SIMULATION DELMIA DE DASSAULT SYSTÈMES

Quentin BOURRET

RÉSUMÉ

Delmia est un logiciel d'une filiale de Dassault Système permettant de tester l'ergonomie de systèmes industriels à l'aide d'un mannequin virtuel. Afin d'automatiser le placement du mannequin virtuel dans son environnement, plusieurs projets ont été définis. Parmi eux, l'étude de mesures de qualité de préhensions, décrite dans ce mémoire, a cherché à définir un classement des préhensions comparable à celui qu'une personne aurait retenu pour maintenir un objet de manière stable.

Deux mesures de qualité ont été testées : une mesurant la stabilité de la préhension, l'autre la capacité de la préhension à utiliser l'objet. Pour les tests, cinq objets couramment utilisés dans l'industrie ont été sélectionnés.

Dans un premier temps, une étude sur la variation des indices en fonction des préhensions a été menée. Dans un second temps, l'influence de certains paramètres sur les mesures a été analysée: le coefficient de friction aux points de contact, les forces maximales par phalanges et la position du centre de masse de l'objet.

Les résultats obtenus sont encourageants pour de futures utilisations de ces deux mesures dans le but de qualifier la qualité de préhensions humaines.

Mots-clés : préhension, mesures de qualité, humain, modélisation

ASSESSMENT OF GRASP QUALITY MEASURES IN DIGITAL HUMAN MODELING

Quentin BOURRET

ABSTRACT

Delmia is a brand of Dassault Systèmes Company that is specialized in ergonomic testing of industrial systems by using a virtual mannequin. Several projects have been defined to automate the positioning of the mannequin. This thesis focusses on the study of grasp quality measures. The objective is to have the same grasps rank between the one given by grasp quality measures and the one given by a human being.

Two grasp quality measures have been tested. The first one measures the stability of the grasp, the second one measures the ability of the grasp to use the object. This quality measure has been used on several grasps on five different objects commonly used on work space design.

First, the variation of the quality measures values as a function of the grasp has been studied. Secondly, the influence of some parameters on the measures has been studied: namely the coefficient of friction, the maximum forces exerted by the phalanx as well as the position of the center of mass of the object.

The results found in our study give to the grasp quality measure its unique performance. It is a promising result for future studies which measure the quality of a grasp like a human do.

Keywords: human, grasp, quality measures, modelization

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Définition de la mesure de qualité de préhension	3
1.2 Méthode de mesure de la qualité de préhension dans le domaine de la robotique	3
1.3 Description des mesures de qualité de préhension couramment utilisées dans la littérature	4
1.3.1 Méthode M1 : Position des points de contact	6
1.3.2 Méthode utilisant les ordres de grandeur des forces appliquées	6
1.3.3 Méthode utilisant la configuration de la main	12
1.3.4 Propriété algébrique de G	12
1.4 Différence d'hypothèses entre le robot et l'humain	14
1.4.1 Modélisation ponctuelle du contact entre la main et l'objet	14
1.4.2 Le coefficient de friction chez le robot et chez l'homme	15
1.4.3 Les forces maximales applicables par point de contact	16
1.4.4 Différents types de préhension	16
1.5 Conclusion de la revue de littérature	17
CHAPITRE 2 METHODOLOGIE	21
2.1 Objectifs	21
2.2 Sélection des mesures de test de qualité de préhension	21
2.2.1 Mesure M2 : plus grand torseur résistant	22
2.2.2 Mesure M5 : mesure orientée action	26
2.3 Sélection des objets de test	26
2.4 Préhensions testées	28
2.5 Méthodologie de création des préhensions	29
2.6 Force extérieure	30
2.7 Détermination des points de contact, de leur vecteur normal et du centre de masse de l'objet	33
2.8 Incertitude sur les mesures	37
2.8.1 Indice de la mesure M5	37
2.8.2 Discrétisation des cônes de friction	39
2.9 Étude de la variation des indices	40
2.9.1 Modification du coefficient de friction	40
2.9.2 Modification des forces maximales par phalange	40
2.9.3 Déplacement du centre de masse de l'objet	42
2.9.3.1 Pour le tournevis électrique	43
2.9.3.2 Pour le marteau	45
CHAPITRE 3 RESULTATS	47

3.1	Variation des indices en fonction de la discrétisation du cône de friction et des préhensions	47
3.1.1	Variation des indices M2 en fonction de l'approximation des cônes de friction.....	47
3.1.2	Variation des indices en fonction des préhensions	50
3.2	Variation des indices en fonction de paramètres physique	52
3.2.1	Modification du coefficient de friction	52
3.2.2	Modification des forces maximales par phalange.....	53
3.2.3	Déplacement du centre du centre de masse des objets	56
CHAPITRE 4 ANALYSE DES RESULTATS		57
4.1	Variation des indices en fonction des préhensions	57
4.2	Variation des indices en fonction de paramètres physique	66
4.2.1	Cônes de friction	66
4.2.2	Forces normales d'une main humaine	66
4.2.3	Position du centre de masse	68
CHAPITRE 5 DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS		71
CONCLUSION.....		75
ANNEXE I Outils sélectionnés par les experts du logiciel Delmia.....		77
ANNEXE II Résultats des tests		79
BIBLIOGRAPHIE.....		83

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Tableau récapitulatif des mesures de qualité de préhension applicables5
Tableau 2.1	Mesures de qualité de préhension sélectionnées22
Tableau 2.2	Liste des objets sélectionnés pour les tests27
Tableau 2.3	Image des 15 préhensions générées sur les 5 objets29
Tableau 2.4	Évolution de l'incertitude sur la mesure M5 en fonction du nombre d'itérations utilisé pour la calculer.....38
Tableau 2.5	Force normale maximale appliquée par chaque phalange en Newton (Enders & Seo, 2011).41
Tableau 2.6	Tableau du calcul des masses respectives de la tête et du manche du marteau45
Tableau 3.1	Valeur des indices des mesures M2 et M5 pour une modélisation du contact uniforme sur toute la main et un coefficient de friction égal à un.....50
Tableau 3.2	Valeur des indices de M2 et M5 avec des forces normales maximales par phalange qu'un humain peut appliquer.....54
Tableau 3.3	a - Tableau du rapport entre les indices obtenus avec une modélisation réaliste du contact et les indices obtenus avec une modélisation uniforme du contact. b – Traitement statistique des valeurs du tableau 3.3 – a55
Tableau 3.4	Tableau de la différence entre des indices obtenus en utilisant le centre géométrique comme point de référence et en utilisant le centre de masse comme point de référence.....56

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	a – Schéma des préhensions P_1 et P_2 avec les forces maximales applicables par la main. b – enveloppe convexe.....	7
Figure 1.2	Illustration du vecteur de plus grande norme auquel la préhension peut résister, quelle que soit sa direction.	8
Figure 1.3	Représentation des cercles R_i de norme F_{xi} définissant l'espace des forces externes auxquelles la préhension peut résister, peu importe leur direction.	9
Figure 1.4	a – Illustration de l'effort externe F_{xc} auquel la préhension doit résister. b – Schéma du calcul de résistance de la préhension à l'effort extérieur F_{xc} : l'effort $-\lambda_i F_{xc} C W_i$	10
Figure 2.1	Vecteur quelconque f_i contenu dans le cône de friction défini par le point de contact C_i , le vecteur normal au point de contact n_i , le demi-angle du cône φ	23
Figure 2.2	Approximation du cône de friction par une pyramide à m cotés.....	24
Figure 2.3	Méthodologie de création de préhension : a – Placement du mannequin dans l'espace pour qu'il ne gêne pas le positionnement de la main sur l'objet. b – Création de la préhension. c – Vérification que les segments de la main voulus sont en contact avec l'objet.	30
Figure 2.4	Force(s) extérieure(s) auxquelles doivent résister les préhensions sur : a - la pince, b – le tournevis, c – le tournevis électrique, d – le marteau, e - la clé anglaise.....	31
Figure 2.5	Force(s) extérieure(s) auxquelles doivent résister les préhensions sur : a - la pince, b – le tournevis, c – le tournevis électrique, d – le marteau, e - la clé anglaise (suite).....	32
Figure 2.6	a - modèle de la main gauche du mannequin de CATIA V5 avec les segments de la main en transparence. b - Modèle de la main gauche du mannequin de CATIA V5 utilisé pour les tests avec la segmentation numérotée choisie	33
Figure 2.7	Illustration et méthodologie de placement des points de contact et de la détermination des vecteurs normaux.....	35
Figure 2.8	Illustration et méthodologie de placement des points de contact et de la détermination des vecteurs normaux. (suite).....	36

Figure 2.9	a – représentation du cône de friction au point de contact C_i . b – Discrétisation du cône de friction en une pyramide à n facettes.....	39
Figure 2.10	Représentation des différentes phalanges de la main ainsi que des carpes et métacarpes (image : https://fr.wikipedia.org/wiki/Phalange_(os)).....	41
Figure 2.11	Position du centre géométrique du tournevis électrique.....	43
Figure 2.12	Isolement de la batterie et de la tête du tournevis électrique et détermination du centre géométrique des deux parties isolées.....	43
Figure 2.13	Position du centre de masse approximé du tournevis électrique	44
Figure 2.14	Position : du centre géométrique du marteau, du centre géométrique de la tête et du manche du marteau, du centre de masse approximé.	46
Figure 3.1	Courbe montrant l'évolution de l'indice de M2 en fonction du nombre de facettes approximant le cône de friction pour la préhension « adaptée » du tournevis électrique.....	48
Figure 3.2	Courbe montrant la variation des indices de M2 par rapport à la valeur de l'indice précédente. La variation des indices est exprimée en pourcentage de la valeur de l'indice.	49
Figure 4.1	a – Vue de face de la préhension « peu adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués.....	59
Figure 4.2	a – Vue de face de la préhension « adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact.	60
Figure 4.3	a – Vue de côté de la préhension « adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de dessous de la préhension « adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'effort	61

Figure 4.4	a – Vue de face de la préhension « peu adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact62
Figure 4.5	a – Vue de face de la préhension « peu adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact63
Figure 4.6	a – Vue de dessous de la préhension « adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact64
Figure 4.7	a – simplifications des préhensions par des préhensions sur un cylindre pour les préhensions « adaptées » du tournevis et du marteau. b – simplification des préhensions par des préhensions sur un cylindre pour les préhensions « peu adaptées » du tournevis et du marteau65
Figure 4.8	a – Vue de face de la préhension « inadaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « inadaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact67

INTRODUCTION

Dassault systèmes est une société spécialisée dans le développement de logiciels de modélisation 3D. Le logiciel de simulation Delmia, développé par une filiale de Dassault systèmes, modélise et simule des chaînes de production industrielle. Le logiciel permet de créer des postes d'assemblage de chaînes de production et de visualiser l'interaction entre l'opérateur et son environnement grâce à un mannequin virtuel.

Dans la version actuelle de Delmia, le positionnement du mannequin se fait en grande partie manuellement. La personne désirant placer le mannequin dans l'environnement doit définir l'orientation dans l'espace de chacune de ses articulations. Cette opération est très coûteuse en temps. En effet, la durée du positionnement du mannequin allonge de manière considérable le temps de conception des postes de travail. Le temps passé par l'utilisateur du logiciel à placer le mannequin dans l'environnement simulé se fait au détriment du temps de test de l'ergonomie des postes de travail.

Afin de remédier à ces problèmes, Dassault systèmes souhaite créer un nouveau moteur de positionnement pour le mannequin de Delmia. L'objectif principal du projet est de positionner le mannequin de la manière la plus automatisée possible. Parmi les sous-objectifs définis, l'un d'entre eux vise à automatiser la préhension manuelle d'objets par le mannequin.

La méthode de préhension automatique par le mannequin se déroule en deux phases. La première consiste à générer des préhensions sur l'objet avec la main du mannequin. La seconde vise à sélectionner, parmi les préhensions générées, la ou les préhensions les plus adaptées à l'objet. L'objectif de ce mémoire est de répondre aux besoins de cette deuxième phase en proposant une méthodologie d'analyse de la qualité de préhension des objets solides par le mannequin virtuel de Delmia. Le but principal est de quantifier de manière objective si une préhension est adaptée à l'utilisation de l'objet. Ces préhensions seront réalisées par le mannequin virtuel de Delmia sur des objets couramment utilisés dans le domaine industriel.

Le chapitre 1 détaille, à travers une revue de la littérature, des mesures de qualité de préhensions appliquées à des préhensions par des mains robotiques et à des préhensions par des mains humaines. Les facteurs pouvant avoir un impact sur les mesures de qualité de préhension sont également abordés lors de cette revue de littérature.

Le chapitre 2 présente la méthodologie adoptée pour réaliser les tests sur les préhensions du mannequin virtuel de Delmia. Les résultats obtenus sont détaillés dans le chapitre 3. Le chapitre 4 interprète les résultats obtenus. Le chapitre 5 discute les résultats et propose de futurs travaux.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Définition de la mesure de qualité de préhension

Le terme « qualité de préhension » réfère en général à la capacité d'une personne ou d'un robot à maintenir un objet de manière stable. Pour pouvoir quantifier cet aspect, des mesures de qualité de préhension ont été introduites. Elles utilisent des caractéristiques géométriques des zones de contacts entre la main et l'objet pris : à savoir la position dans l'espace des points de contact, la direction des vecteurs normaux à ces points de contact. Les sections suivantes présentent, pour chacune des mesures de la qualité de préhension, une valeur d'indice.

1.2 Méthode de mesure de la qualité de préhension dans le domaine de la robotique

Les mesures de test de qualité de préhension dans la robotique répondent au besoin de prise d'objet par des mains robotiques. Lorsqu'un robot veut prendre un objet, plusieurs prises s'offrent à lui (Máximo A. Roa, 2014). Les indices donnés par les mesures de qualité de préhension permettent au robot de sélectionner la prise dite « optimale ».

Il existe un grand nombre de mesures de qualité de préhension. Lors de la préhension d'objets, les algorithmes utilisés pour mesurer la qualité de celle-ci prennent en compte les éléments suivants (Máximo A. Roa, 2014) :

- a. La résistance aux perturbations : une préhension doit pouvoir résister à des perturbations (efforts extérieurs) quand l'objet est immobile.
- b. La dextérité : une préhension est agile si la main robotique peut déplacer l'objet dans un objectif de réalisation de la tâche attendue.

- c. L'équilibre : une préhension est en équilibre si la résultante des forces et des moments appliqués au centre de gravité de l'objet est nulle.
- d. La stabilité : une préhension est stable si elle peut revenir à son état d'origine après avoir subi une perturbation externe telle une force ou un couple.

Máximo (2014) a réalisé une revue de littérature sur les mesures abordant l'aspect de la résistance aux perturbations et de la dextérité de la préhension manuelle. Ces mesures de test de qualité de préhension peuvent être classées en trois groupes (M. A. Roa, Koiva, & Castellini, 2012) :

- a. Les mesures prenant en compte le contact entre la main robotique et l'objet.
- b. Les mesures associées à la configuration de la main robotique.
- c. Les mesures hybrides qui combinent plusieurs critères de qualité de préhension.

Parmi ces trois groupes, le plus utilisé est le groupe (a), c'est-à-dire le groupe prenant en compte le contact entre la main robotique et l'objet (Máximo A. Roa, 2014). Les caractéristiques géométriques utilisées par ce groupe de mesure sont les suivantes :

- a. La position du centre de masse de l'objet.
- b. La position des points de contact entre la main robotique et l'objet.
- c. Le vecteur normal aux points de contact.
- d. Le coefficient de friction entre la main robotique et l'objet.

1.3 Description des mesures de qualité de préhension couramment utilisées dans la littérature

Cette section présente dix méthodes de mesure de test de qualité de préhension couramment utilisées dans la littérature (Máximo A. Roa, 2014), (Leon, Sancho-Bru, Jarque-Bou, Morales, & Roa, 2012), (M. A. Roa et al., 2012) et applicables dans un contexte d'humain simulé (mannequin). Ces méthodes sont définies dans le tableau 1.1. Les dix méthodes sont classées en 4 catégories qui rassemblent les mesures selon les caractéristiques physiques qu'elles prennent en compte :

- a. La position des points de contact entre la main et l'objet.
- b. L'ordre de grandeur des forces appliquées aux points de contact.
- c. Les angles articulaires de la main.
- d. Les propriétés algébriques de la matrice de préhension G (matrice des orientations des vecteurs normaux aux points de contact définie à la section 1.3.4. du mémoire).

Tableau 1.1 Tableau récapitulatif des mesures de qualité de préhension applicables au contexte de la prise d'objets pas un humain.

Catégories	Nom	Nom de la mesure	Référence
Position des points de contact	M1	Distance between the centroid of the contact points and the object's center of mass (Distance entre le centroïde des points de contact et le centre de masse de l'objet)	Ding, Liu and Wang, 2000
Ordre de grandeur des forces appliquées	M2	Largest wrench to be resisted (plus grand torseur résistant)	Ferrari and Canny 1992
	M3	Volume of the convex hull (Volume de l'enveloppe convexe)	Miller and Allen 1999
	M4	Decoupling forces and torques (Maximisation séquentielle des forces et moments)	Mirtich and Canny 1994
	M5	Task oriented measure (Mesure orientée action)	Borst et al. 2004
	M6	Normal Grasping Force (Force normale de préhension)	Liu et al. 2004
Les angles articulaires de la main	M7	Posture of hand finger joints (Angles articulaires)	Liegeois 1977
Propriétés algébriques de G	M8	Smallest singular value of G (Valeur singulière de G la plus petite)	Li and Sastry 1987
	M9	Volume of the ellipsoid in the wrench space (Volume de l'ellipsoïde dans l'espace des torseurs)	Li and Sastry 1987
	M10	Grasp Isotropy Index (Indice d'isotropie de la préhension)	Kim et al. 2001

La section suivante présente les mesures de qualité de préhension du tableau 1.1 et les mesures M2 et M5, utilisées lors des tests seront détaillées dans la partie 1.5.

1.3.1 Méthode M1 : Position des points de contact

Cette catégorie ne contient qu'une **mesure : M1** (Máximo A. Roa, 2014). Cette mesure cherche à réduire la distance (norme) entre le centroïde des points de contact de la main avec l'objet g_c et le centre de masse de l'objet g_o . Plus l'indice de cette mesure est petit, plus l'effet d'inertie lors de la manipulation (M. A. Roa et al., 2012) est faible, donc plus il est facile de manipuler l'objet.

$$I_{M1} = distance(g_o, g_c) \quad (1.1)$$

Cette mesure ne prend en compte que la position des points de contact, pas leur nombre ou les forces qui y sont appliquées (M. A. Roa et al., 2012).

1.3.2 Méthode utilisant les ordres de grandeur des forces appliquées

C'est la catégorie contenant le plus de mesures de qualité de préhension. Les mesures présentes dans cette catégorie tiennent compte de la position des points de contact, de la direction des vecteurs forces appliqués aux points de contact ainsi que de l'ordre de grandeur des forces appliquées.

Les **mesures M2, M3 et M5** utilisent les mêmes éléments physiques pour mesurer la qualité des préhensions. Elles tiennent compte de la position des points de contact, de la direction des forces appliquées aux points de contact, ainsi que du coefficient de friction entre la main et l'objet. Grâce à ces éléments, l'ensemble des torseurs d'effort (forces et moments) applicables par la main sur l'objet est calculé. L'enveloppe convexe W de l'ensemble des torseurs applicables par la main sur l'objet est ensuite définie. Ces mesures supposent que la préhension peut résister à un torseur externe s'il est contenu à l'intérieur de l'enveloppe convexe. Chaque mesure effectue un calcul différent sur cette enveloppe convexe.

La mesure M3 mesure le volume de l'enveloppe convexe généré par les torseurs d'effort appliqués par la main sur l'objet. Elle suppose que plus le volume de l'enveloppe convexe est

grand, plus la préhension aura une grande probabilité de résister à un effort externe. Cependant cette mesure ne considère pas le cas où une enveloppe convexe a un volume très grand, mais qu'il existe un torseur de norme faible auquel la préhension ne peut pas résister (Máximo A. Roa, 2014). 4

$$I_{M3} = \text{Volume}(W) \quad (1.2)$$

Exemple :

Pour illustrer les mesures qui suivent, le cas le plus simple possible est considéré. Les forces étudiées sont dans un espace à deux dimensions et on considère que toutes les forces sont appliquées au même point. Ainsi aucun moment n'intervient lors de la préhension.

Soit un point C dans l'espace. Une main robotique avec trois doigts et donc trois points de contact, réalise deux préhensions P_1 et P_2 . Pour chaque préhension, trois forces sont appliquées : $P_1(f_1, f_2, f_3)$ et $P_2(f_4, f_5, f_6)$ (figure 1.1 a).

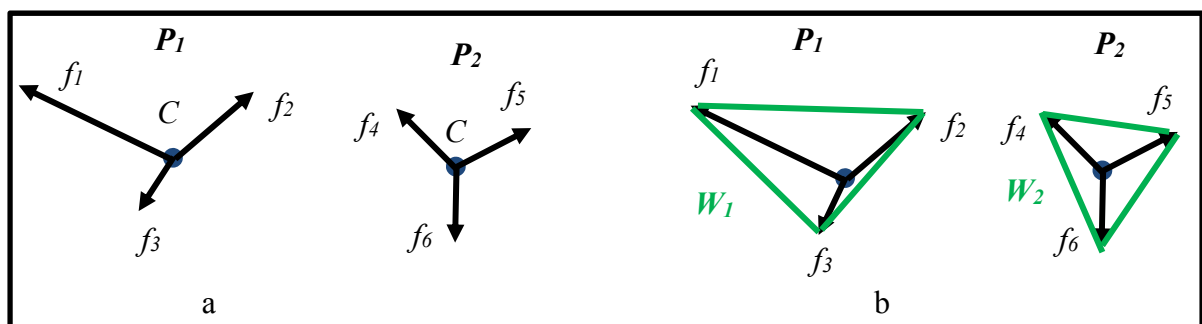


Figure 1.1 a – Schéma des préhensions P_1 et P_2 avec les forces maximales applicables par la main. b – enveloppe convexe

Pour simplifier l'exemple, on considère qu'un coefficient de friction de 0 s'applique au point de contact. Ainsi, les doigts de la main robotique ne peuvent appliquer que les forces f_i aux points de contact. Les forces f_i appliquées en C sont les forces maximales applicables par la main sur l'objet. Les résultants des forces appliquées pour chaque préhension sont donc contenus dans l'enveloppe convexe W_i de la préhension P_i (Ferrari & Canny, 1992).

M3 mesure le volume de l'enveloppe convexe. Plus le volume est grand, plus la préhension devrait pouvoir résister à un effort externe. Sur l'exemple de la figure 1.1 – b, l'enveloppe convexe W_1 de la préhension P_1 a un volume plus grand que l'enveloppe convexe W_2 de P_2 . Pour la mesure M3, la préhension P_1 aura donc un indice plus élevé que la préhension P_2 .

La méthode M2 mesure la plus grande norme de torseur à laquelle la préhension peut résister, quelle que soit son orientation (Ferrari & Canny, 1992). Leon (2012) explique que cela revient à mesurer la plus petite norme d'un torseur ω tel qu'il soit situé sur la bordure de l'enveloppe convexe W .

$$I_{M2} = \min_{\omega \in \text{bordure}(W)} \|\omega\| \quad (1.3)$$

Exemple

M2 calcule les points de l'enveloppe convexe les plus proches de C . Pour P_1 , la plus petite distance entre le point C et la limite de l'enveloppe convexe W_1 est $\|F_{x1}\|$. Pour P_2 , la plus petite distance entre le point C et la limite de l'enveloppe convexe W_2 est $\|F_{x2}\|$.

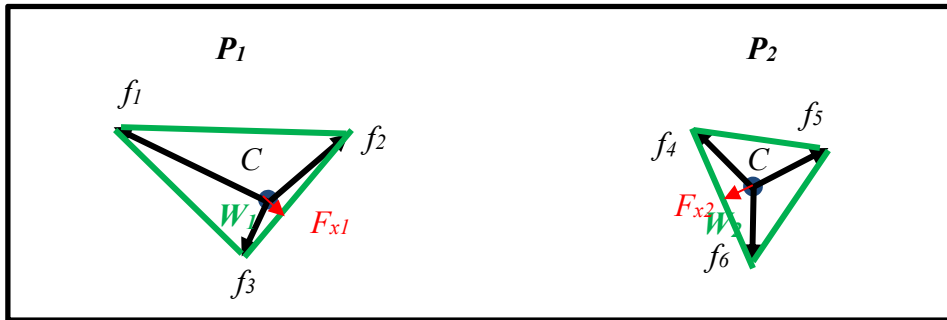


Figure 1.2 - Illustration du vecteur de plus grande norme auquel la préhension peut résister, quelle que soit sa direction.

M2 définit ensuite le cercle R_i de norme égale à F_{xi} . Ce cercle définit l'espace de forces extérieures auxquelles la préhension peut résister, peu importe la direction des forces.

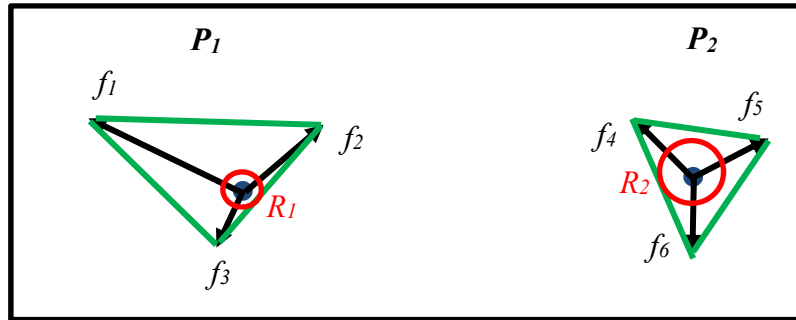


Figure 1.3 – Représentation des cercles R_i de norme F_{xi} définissant l'espace des forces externes auxquelles la préhension peut résister, peu importe leur direction.

La préhension P_1 peut résister à toute force externe de norme inférieure ou égale à R_1 . La préhension P_2 peut résister à toute force externe de norme inférieure ou égale à R_2 . R_2 est plus grand que R_1 donc la préhension P_2 aura un indice plus grand que P_1 selon la mesure M2.

M2 et **M3** sont utiles lorsque l'on ne connaît pas le ou les torseurs auxquels la préhension doit résister. Dans la mesure **M5**, ces torseurs sont connus ω_{ext} . Cette mesure détermine le plus grand coefficient λ par lequel peuvent être multipliés ces torseurs externes à la préhension, tel qu'ils soient contenus à l'intérieur de l'enveloppe convexe. Plus le coefficient multiplicateur est grand, plus la préhension sera capable de résister aux torseurs externes donnés et donc meilleure sera la qualité de la préhension.

$$I_{M5} = \max_{\lambda \omega_{ext} \subset W} \lambda \quad (1.4)$$

Exemple

Pour les préhensions P_1 et P_2 , la résistance à l'effort externe connu F_{xc} (figure 1.4)

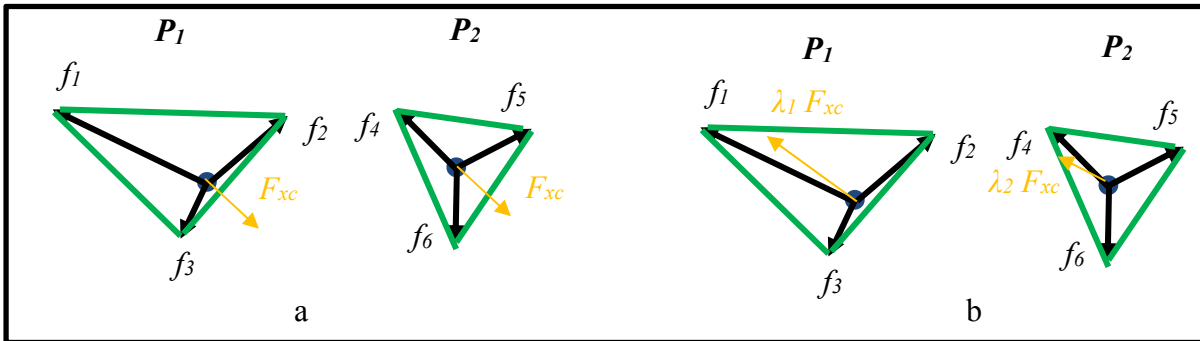


Figure 1.4 – a – Illustration de l'effort externe F_{xc} auquel la préhension doit résister. b – Schéma du calcul de résistance de la préhension à l'effort extérieur F_{xc} : l'effort $-\lambda_i F_{xc} C W_i$.

Pour tester la capacité des préhensions P_1 et P_2 à résister à l'effort externe F_{xc} , on cherche le plus grand coefficient λ_i par lequel peut être multiplié $-F_{xc}$ tel que $-\lambda_i F_{xc} C W_i$.

Dans l'exemple de la figure 1.4 – b, λ_1 est plus grand que λ_2 , ainsi d'après la mesure M5, la préhension P_1 résistera mieux à l'effort extérieur F_{xc} que la préhension P_2 .

La **mesure M4** utilise le même principe que la **mesure M2**, cependant au lieu de prendre en compte simultanément les forces et moments appliqués par la main sur l'objet, **M4** les mesure de manière séquentielle. La méthode **M4** mesure la plus grande norme de la force à laquelle la préhension peut résister $\|f\|$, indépendamment de la direction de celle-ci, par ailleurs, elle mesure la plus grande norme du moment $\|\tau\|$, auquel la préhension peut résister. En considérant les forces et moments de manière séparée, la mesure **M4** contourne le problème de la méthode **M2** qui mesure simultanément deux éléments non homogènes : les forces et les moments du torseur. Cependant, **M4** donne deux indices, un pour les forces et un pour les moments. Une préhension considérée optimale en ne prenant en compte que les forces ne le sera pas nécessairement en ne considérant que les moments (Máximo A. Roa, 2014). Ainsi l'ordre dans lequel elles sont prises en compte pour sélectionner la meilleure préhension peut affecter la solution. Par exemple les deux méthodes de classement suivantes pourraient donner un résultat différent :

1. Parmi un ensemble de cent préhensions, les dix meilleures préhensions qui ne considèrent que les forces sont gardées, puis classées à nouveau en ne considérant que les moments.
2. Parmi un ensemble de cent préhensions, les dix meilleures préhensions qui ne considèrent que les moments sont gardées, puis classées à nouveau en ne considérant que les forces.

$$I_{M4f} = \min_{\tau_m \in \text{bordure}(W_f)} \|f\| \quad (1.5)$$

$$I_{M4\tau} = \min_{\omega \in \text{bordure}(W_\tau)} \|\tau\| \quad (1.6)$$

W_f et W_τ sont respectivement les enveloppes convexes des forces et des moments applicables par la main sur l'objet.

Pour être calculée, la mesure **M6** (comme M5) nécessite de connaître la force extérieure f_{ext} à laquelle doit résister la préhension. (Máximo A. Roa, 2014) expliquent que la somme des composantes normales f^N aux forces f appliquées par la main sur l'objet, donne un indice sur l'efficacité des forces appliquées sur l'objet. Plus la somme des composantes normales est grande, plus les efforts appliqués sont efficaces. La mesure **M6** calcule l'inverse des grandeurs des composantes normales aux forces appliquées par la main sur l'objet pour résister à un torseur externe connu. Plus **M6** est petite, plus les forces appliquées sont efficaces et meilleure est la préhension.

$$I_{M6} = \min_{Gf=f_{ext}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n f_i^N} \quad (1.7)$$

N est le nombre de points de contact entre la main et l'objet et G la matrice de préhension.

Contrairement aux autres mesures de cette catégorie, **M6** ne prend en compte ni les moments appliqués aux points de contact ni les forces de frottement entre la main et l'objet. Seule la composante normale aux forces appliquées aux points de contact est prise en compte.

1.3.3 Méthode utilisant la configuration de la main

Cette catégorie ne compte qu'une **mesure : M7**. Elle mesure la position angulaire des articulations de la main (Liegeois, 1977) . Elle calcule pour chaque articulation, l'écart entre la position de l'articulation pour la prise de l'objet et la position optimale de l'articulation.

$$I_{M7} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - a_i}{R_i} \right)^2 \quad (1.8)$$

Avec n le nombre de segments de la main, y_i la position angulaire du segment i , a_i la position angulaire optimale du segment et R_i l'amplitude articulaire entre a_i et la limite inférieure ou supérieure. On choisit de prendre la limite inférieure ou supérieure du segment pour déterminer R_i de la manière suivante :

$$R_i = \begin{cases} a_i - y_i & \text{si } y_i < a_i \\ a_i + y_i & \text{si } y_i > a_i \end{cases} \quad (1.9)$$

$$a_i = \frac{R_i}{2}$$

La position optimale est la position située au centre de la plage angulaire de l'articulation, car c'est celle qui permet d'avoir la plus grande possibilité de mouvement. Ainsi, selon cette mesure, plus la position de la main lors de la préhension est proche de la position optimale, meilleure est la préhension.

1.3.4 Propriété algébrique de G

Cette catégorie contient 4 mesures de qualité de préhension qui utilisent les propriétés algébriques de la matrice de préhension G pour déterminer la qualité de la préhension. La matrice de préhension G est une matrice qui regroupe l'ensemble des rotations du repère de l'objet vers les repères situés aux points de contact (Prattichizzo & Trinkle, 2016). Elle permet d'avoir, en une seule matrice, l'orientation des vecteurs normaux aux points de

contact. Dans un espace à trois dimensions $G \in \mathbb{R}^{6 \times 6n}$ avec n le nombre de points de contact entre la main et l'objet lors de la préhension. Une matrice de préhension a six valeurs singulières qui sont les racines carrées des valeurs propres de GG^T .

M8 et **M9** utilisent les propriétés des valeurs singulières de la matrice G . **M8** calcule la plus petite valeur singulière de G , c'est-à-dire qu'elle mesure à quel point la préhension est proche de basculer dans une configuration singulière.

$$I_{M8} = \sigma_{\min}(G) \quad (1.10)$$

Lorsqu'une préhension est dans une configuration singulière, au moins une des valeurs singulières de la matrice G est égale à 0. A l'opposé, **M9** prend en compte toutes les valeurs singulières de la matrice de préhension G .

$$I_{M9} = \sqrt{\det(GG^T)} \quad (1.11)$$

Cette mesure donne une idée globale de la contribution de chacune des forces de contact lors de la préhension (Leon et al., 2012). Les indices donnés par **M8** et **M9** cherchent tous les deux à être maximisés.

La **mesure M10** cherche à avoir une préhension dite isotrope, c'est-à-dire qu'elle cherche à ce que la contribution des forces au niveau des points de contact soit uniforme (Leon et al., 2012). Elle va pour cela diviser la plus petite valeur singulière de la matrice G par sa plus grande valeur singulière.

$$I_{M10} = \frac{\sigma_{\min}(G)}{\sigma_{\max}(G)} \quad (1.12)$$

L'indice renvoyé par cette mesure est égal à 1 quand la préhension est isotrope, c'est-à-dire que les normes des forces de contact sont égales. Plus la préhension est proche d'une position

singulière, moins la répartition des forces de contact sera uniforme et plus l'indice sera proche de 0.

Ces mesures ne tiennent pas compte des limites de force applicables aux points de contact. De plus (Leon et al., 2012) montrent que ces trois mesures donnent le même classement pour toutes les préhensions qu'ils ont testées. Ils en concluent que ces trois mesures donnent la même évaluation de la préhension.

1.4 Différence d'hypothèses entre le robot et l'humain

Les mesures de qualité de préhension présentées dans le chapitre précédent ont été conçues pour pouvoir mesurer des préhensions d'objet par un robot. Dans ce mémoire, on veut appliquer certaines de ces mesures à des préhensions d'objet par un humain simulé. Cette section détaille trois hypothèses simplificatrices utilisées en robotique :

- La modélisation ponctuelle du contact entre la main et l'objet
- Le coefficient de friction
- Les différents types de préhension

Les sections suivantes vérifient si ces hypothèses simplificatrices s'appliquent au contexte de préhension d'objet par un humain simulé.

1.4.1 Modélisation ponctuelle du contact entre la main et l'objet

En raison de la grande élasticité de la peau, une main humaine est différente d'une main robotique. Lorsqu'un robot prend un objet, il est cohérent de simplifier par un point le contact entre la main robotique et l'objet, en raison de la faible zone de contact. Cependant, cette simplification n'est pas forcément cohérente lorsqu'on utilise les mesures de qualité de préhension sur des saisies effectuées par une main humaine. (M. A. Roa et al., 2012) proposent dans leur article d'utiliser une autre modélisation que la modélisation ponctuelle lorsque des humains prennent des objets. Ils comparent dans leur article les résultats de deux

mesures de qualité de préhension en utilisant, une modélisation ponctuelle du contact et une autre modélisation qui prend en compte les aires de contact entre la main et l'objet. Les indices retournés par les mesures de qualité de préhension, lorsqu'une modélisation ponctuelle du contact est utilisée, sont inférieurs à ceux retournés lorsqu'on utilise une modélisation qui prend en compte les aires de contacts. Cependant la variation des indices des mesures est très similaire entre les deux modélisations. (M. A. Roa et al., 2012) arrivent à cette conclusion en testant des mesures de qualité de préhension avec des préhensions réelles d'humain sur un cylindre doté de capteurs de pression permettant de définir les zones de contact entre l'objet et la main. Lors des tests, quatre sujets réalisent neuf préhensions avec chacune un nombre différent de doigts utilisés sur deux zones distinctes de l'objet.

Un autre objectif de cet article était de comparer la perception subjective de qualité de préhension des participants avec les indices donnés par des mesures de qualité de préhension. (M. A. Roa et al., 2012) demandent à chacun des participants de noter, sur une échelle de 1 à 7, la qualité de la préhension ressentie sur chacune des prises réalisées sur l'objet. Ils comparent ensuite, pour les mêmes prises sur l'objet, cette notation subjective des participants avec les mesures de qualité de préhension : M1, M2, M3, M8 et M10. Ils montrent que la mesure M2 (plus grand torseur résistant) donne la variation d'indice la plus proche de celle donnée par les humains.

1.4.2 Le coefficient de friction chez le robot et chez l'homme

Pour un robot, il est facile de connaître le coefficient de friction entre une main robotique et un objet si les deux matériaux en contact sont connus. Pour l'Homme, la détermination du coefficient de friction de la peau est plus difficile. (Derler & Gerhardt, 2012) montrent que ce coefficient varie du simple au double suivant le niveau d'hydratation de la peau. De plus, le coefficient de friction diminue si on augmente la pression appliquée sur la peau. Il varie de 0.5 à 1.5. Comme le coefficient de friction de la peau varie, les articles utilisant des mesures de qualité de préhensions sur des humains prennent des valeurs différentes pour ce même coefficient. (Goussous, 2007) utilise un coefficient de friction de 0,577, (M. A. Roa et al.,

2012) définissent $\mu = 0,4$, (Endo et al., 2007a) prennent une valeur de $\mu = 1$, car elle se situe au milieu de la plage possible des valeurs que peut prendre μ .

1.4.3 Les forces maximales applicables par point de contact

Les mesures M2, M3, M4, M5 prennent en compte les forces normales maximales applicables aux points de contact. L'hypothèse généralement retenue dans le domaine de la robotique avance que la norme maximale des forces normales aux points de contact est identique pour tous les points de contact. Cette hypothèse est vraie si on considère que tous les manipulateurs de la main robotique ont une même puissance. Ainsi, pour simplifier les calculs, on normalise toutes les forces normales maximales applicables aux points de contact à un. Cette hypothèse, cohérente lorsqu'on prend un objet avec une main robotique, l'est beaucoup moins lorsqu'un humain prend un objet. (Enders & Seo, 2011) montrent dans leur article que pour un humain, les forces maximales applicables par phalange sont très différentes. Par exemple : La phalange distale du pouce peut appliquer une force maximale de 44.1 newtons, contre 7.0 newtons pour la phalange médiale de l'auriculaire. Aucun auteur d'article n'a utilisé les mesures M2, M3, M4 et M5 en prenant en compte les forces maximales réelles qui peuvent être appliquées au point de contact.

1.4.4 Différents types de préhension

Dans le domaine de la robotique, la plupart des algorithmes de préhension d'objet n'utilisent que les effecteurs finaux, c'est-à-dire le bout des doigts de la main robotique pour prendre les objets. Ainsi, il existe des mesures de qualité de préhension qui ne sont utilisables que si la préhension est réalisée avec le bout des doigts, que ce soit pour une main robotique ou une main humaine. Parmi les douze mesures de qualité que (Leon et al., 2012) utilisent, certaines ne sont applicables qu'avec des préhensions réalisées avec le bout des doigts. Ces préhensions sont réalisées sur un cylindre réel avec une main humaine, la position des doigts sur l'objet est mesurée par un système VICON. Pour que l'ensemble de ces mesures soit applicable (Leon et al., 2012) limitent leur étude à la prise d'objet par une main humaine en n'utilisant que le bout des doigts. Cependant un humain prend rarement les objets avec le

bout des doigts. (Feix, Romero, Schmiedmayer, Dollar, & Kragic, 2016) définissent un type de préhension humain dit « prise en puissance » dans leur taxonomie des préhensions humaines. Ces préhensions en puissance sont utilisées par l'homme lorsqu'il souhaite avoir une prise ferme sur l'objet. Si l'on souhaite effectuer des tests utilisant l'ensemble des préhensions que peut effectuer un humain, les mesures de qualité de préhension qui ne sont utilisables qu'avec des préhensions réalisées avec le bout des doigts sont à écarter.

1.5 Conclusion de la revue de littérature

Cette revue de littérature fait apparaître qu'un grand nombre de mesures de qualité de préhension existe. Initialement, ces mesures ont été conçues pour permettre à des robots de prendre des objets. Peu d'articles utilisent des mesures de qualité de préhension sur des préhensions humaines. Le tableau de synthèse (tableau 1.2) récapitule les résultats et les conclusions des articles ayant utilisé les mesures M1 à M10 dans le contexte de préhension d'objet par des humains.

Tableau 1.2 - Tableau de synthèse

Mesures	Auteurs	Objets utilisés	Objectif de l'article	Valeurs de la mesure	Conclusion
M1	(Maximo A. Roa & Suarez, 2015)	Rectangle à deux dimensions	Revue de littérature sur les mesures de qualité de préhensions existantes	[0 - 1,0512]	Cette mesure est limitée car elle ne prend pas en compte le nombre de points de contact lors de la préhension
	(M. A. Roa et al., 2012)	Cylindre	Comparer les indices de mesure de qualité de préhension avec la notion de qualité de préhension de l'homme	Corrélation avec la notion de qualité de préhension chez l'homme : 0,75	Le nombre de doigts utilisés lors de la préhension n'influence pas les indices donnés par la mesure
M2	(Maximo A. Roa & Suarez, 2015)	Rectangle à deux dimensions	Revue de littérature sur les mesures de qualité de préhensions existantes	[0,0401 - 0,4472]	C'est la mesure la plus utilisée dans la littérature car il a une signification physique claire et utile pour la saisie d'objet
	(Endo et al., 2007)	Cylindres et prismes	Comparer les mesures de qualité des préhensions avec la notation de préhension des sujets	[0 - 0,8]	La mesure M2 donne une indication sur la stabilité de préhension similaire à celle d'un humain
	(M. A. Roa et al., 2012)	Cylindre	Comparer les mesures de qualité des préhensions avec la notation de préhension des sujets	Corrélation avec la notion de qualité de préhension chez l'homme : 0,93	La mesure M2 est celle se rapprochant le plus de la notion de qualité de préhension de l'homme
M8 M9 M10	(Maximo A. Roa & Suarez, 2015)	Rectangle à deux dimensions	Revue de littérature sur les mesures de qualité de préhensions existantes	-	Ces 3 mesures utilisent les mêmes éléments physiques. La variation de leurs indices
	(Leon et al., 2012)	Cylindre	Etudier les variations des indices donnés par les mesures	-	
	(M. A. Roa et al., 2012)	Cylindre	Comparer les mesures de qualité des préhensions avec la notation de préhension des sujets	Corrélation avec la notion de qualité de préhension chez l'homme : M8 : 0,92 M10 : 0,92	Les mesures M8 et M10 donnent un indice de qualité de préhension proche de celui de la notion de préhension de l'homme

La synthèse de la littérature montre que M1 est couramment utilisé, mais qu'elle est très limitée, car elle ne prend pas en compte le nombre de points de contact et les forces qui y sont appliquées lors de la préhension. La mesure M2 est la plus couramment utilisée dans la littérature. Elle a une signification physique claire et prend en compte les forces appliquées par la main sur l'objet lors de la préhension (Maximo A. Roa & Suarez, 2015). (Endo et al., 2007b) et (M. A. Roa et al., 2012) ont montré dans leurs articles que M2 est une mesure dont la variation des indices est très similaire à la variation de notation de préhension par des humains. M2 peut donc être utilisée pour prédire la préhension d'un objet par un homme. Les mesures M3 à M7 n'ont pas été largement utilisées dans littérature. (Maximo A. Roa & Suarez, 2015) et (Leon et al., 2012) ont montré que M8, M9 et M10 utilisent les mêmes notions physiques pour calculer leurs indices. La variation de leur indice est donc très

similaire. (M. A. Roa et al., 2012) a également trouvé que la variation des indices de M8 et M10 est très proche de la variation de notation de préhension d'humains. M8 et M10 peuvent également être utilisées pour prédire la préhension d'un objet par un homme.

L'objectif de ce mémoire est de pouvoir déterminer, à partir de mesures de qualité de préhension, la meilleure préhension parmi un ensemble de préhensions réalisées sur un objet par un mannequin virtuel. La revue de littérature a identifié que la mesure M2 est la plus apte à remplir ce rôle. Dans ce mémoire, l'objectif est de sélectionner la meilleure préhension pour qu'un mannequin virtuel puisse se placer automatiquement dans un environnement industriel. Le contexte d'utilisation de mesures de qualité diffère, en ce sens, de celui présent dans la littérature. Les objets utilisés dans l'industrie ne sont pas identiques à ceux utilisés dans la littérature. (Endo et al., 2007b) et (M. A. Roa et al., 2012) utilisent des objets de formes simples : cylindres et prismes. Les variations de la mesure M2 ne sont pas connues lorsque les préhensions testées sont réalisées sur des objets de formes complexes.

La revue de littérature a fait apparaître que certaines hypothèses sur les forces maximales par phalange, utilisées dans le domaine de la robotique, ne sont pas adaptées au contexte de préhension d'objets par un humain.

Le chapitre suivant détaille la méthodologie des tests réalisés. Dans un premier temps, on observera la variation des indices des mesures sélectionnées en fonction de préhensions réalisées sur des objets couramment utilisés dans l'industrie. Dans un second temps, on étudiera l'influence de certains paramètres sur les indices donnés par les mesures M2 et M5 : le coefficient de friction, les forces maximales par phalange et la position du centre de masse de l'objet.

CHAPITRE 2

METHODOLOGIE

2.1 Objectifs

L'objectif de ce mémoire est de présenter une méthode d'analyse permettant, à partir de mesures de qualité de préhension, de déterminer la meilleure préhension parmi un ensemble de préhensions réalisées sur un objet par un mannequin virtuel. Dans notre cas d'étude, on appelle « meilleure préhension » ou « préhension optimale », la préhension qui serait vraisemblablement choisie par un humain.

2.2 Sélection des mesures de test de qualité de préhension

Ce mémoire présente uniquement la prise d'objet par un humain simulé évoluant dans un environnement industriel. L'étude de cas choisie se limite à deux contextes de prise d'objet :

- a. Prendre un objet pour le porter
- b. Prendre un objet pour l'utiliser

Les mesures M2 (plus grand torseur résistant) et M5 (mesure orientée action) ont été choisies pour réaliser les tests. Ces deux mesures sont celles qui intègrent le plus de caractéristiques physiques au niveau du contact entre la main et l'objet : forces normales, moments, coefficient de friction.

Roa et al. (2012) ont montré dans leur article que la méthode M2 est la mesure de qualité de préhension la plus proche de la notion de qualité de préhension pour l'homme. M2 mesure la plus grande norme de torseur à laquelle la préhension peut résister, quelle que soit la direction du torseur. Dans notre étude, M2 est assimilée à la mesure de la capacité de la préhension à prendre un objet afin de le porter.

La mesure M5 donne la capacité de la préhension à résister à des torseurs connus. Dans nos tests, M5 est choisie pour déterminer la capacité de la préhension à utiliser l'objet.

Tableau 2.1 - Mesures de qualité de préhension sélectionnées

Mesures utilisées pour les tests	
M2	Largest wrench to be resisted (plus grand torseur résistant)
M5	Task oriented measure (Mesure orientée action)

La section suivante détaille la méthodologie de calcul des indices des mesures listées tableau 2.1.

2.2.1 Mesure M2 : plus grand torseur résistant

Ferrari & Canny (1992) définissent le calcul du plus grand torseur résistant de la manière suivante.

Soit une préhension consistant en n points de contact. Une préhension peut être représentée comme un ensemble de points de contact $G = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. Le modèle de friction de Coulomb s'applique en chacun des points de contact. Ainsi, pour assurer le non-glissement des points de contact, la force f_i appliquée au point C_i doit rester à l'intérieur du cône de friction défini par : le point de contact C_i , le demi-angle du cône φ et le vecteur normal au point de contact n_i (figure 2.1).

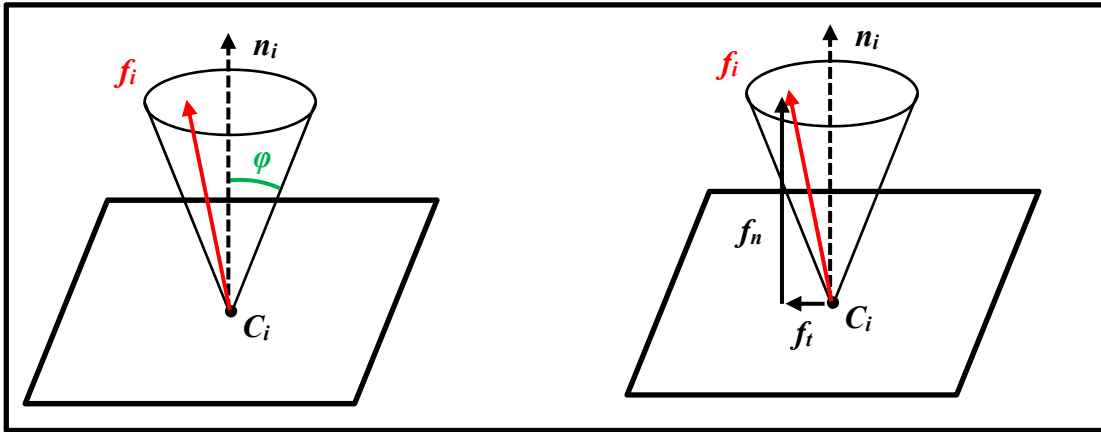


Figure 2.1 - Vecteur quelconque f_i contenu dans le cône de friction défini par le point de contact C_i , le vecteur normal au point de contact n_i , le demi-angle du cône φ

Le coefficient de friction μ est défini par : $\mu = \tan(\varphi)$.

De plus, la contrainte du cône de friction peut s'écrire :

$$f_t \leq \mu f_n \quad (2.1)$$

Où f_t est la composante tangentielle du vecteur force f_i et f_n sa composante normale. (Ferrari & Canny, 1992) supposent, dans la définition de cette mesure, que la somme de l'amplitude des forces applicables par la main sur l'objet est limitée à 1.

$$\sum_{j=1}^m \|f_i\| \leq 1 \quad (2.2)$$

Le cône de friction est approximé en une pyramide à m côtés, appelée pyramide de friction, voir figure 2.2. Les côtés de la pyramide de friction peuvent être exprimés sous la forme de vecteurs $f_{ij}, j = 1, \dots, m$.

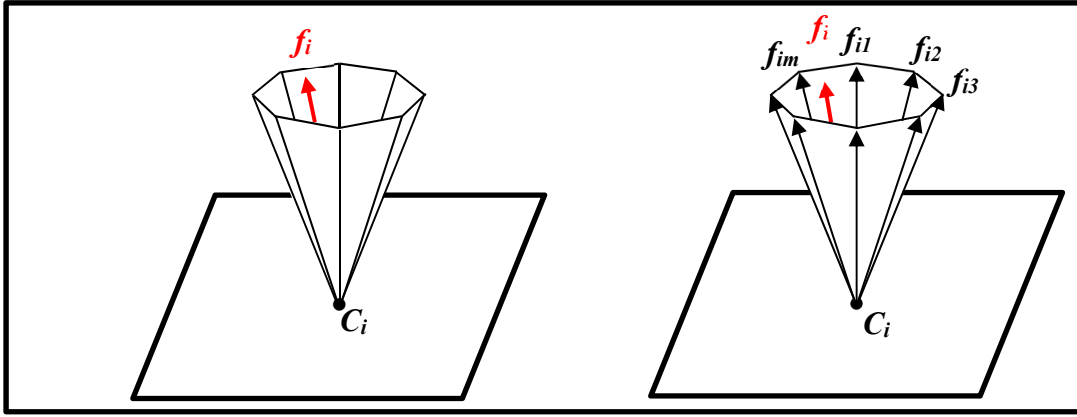


Figure 2.2 - Approximation du cône de friction par une pyramide à m cotés

Ainsi, le vecteur force f_i appliqué au point de contact C_i peut s'exprimer comme une combinaison linéaire des forces unitaires f_{ij} , à chacun des côtés de la pyramide :

$$f_i = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} f_{ij}, \alpha_{ij} \geq 0, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \leq 1 \quad (2.3)$$

Où f_{ij} représente le $j^{\text{ème}}$ vecteur force autour de la $i^{\text{ème}}$ pyramide de friction, et α_{ij} sont des coefficients non négatifs, appliqués à chacun des vecteurs f_{ij} .

La force f_i appliquée au point de contact génère un couple sur l'objet noté τ_i donné par $r_i \times f_i$. Où r_i est le vecteur pointant du centre de masse de l'objet vers le point d'application de la force, c'est-à-dire vers le point C_i . De la même manière que f_i , τ_i peut s'exprimer comme une combinaison linéaire des moments τ_{ij} , générés par les vecteurs f_{ij} situés sur les côtés de la pyramide :

$$\tau_i = \sum_{j=1}^m \tau_{ij} \quad (2.4)$$

$$\tau_i = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} (r_i \wedge f_{ij})$$

En utilisant le système de coordonnées du centre de masse de l'objet, il est obtenu pour chaque point de contact un torseur ω_i :

$$\omega_i = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \omega_{ij} \quad (2.5)$$

$$\omega_i = \begin{pmatrix} f_i \\ \tau_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_i \\ r_i \wedge f_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} f_{ij} \\ r_i \wedge \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} f_{ij} \end{pmatrix}$$

Où ω_{ij} est le torseur généré par le vecteur f_{ij} , aussi appelé torseur primitif.

L'ensemble des torseurs possibles W_i originaires du point de contact C_i peut être exprimé de la manière suivante :

$$W_i = \left\{ \omega_i \mid \omega_i = \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \omega_{ij}, \alpha_{ij} \geq 0, \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} \leq 1 \right\} \quad (2.6)$$

En faisant cela pour chacun des points de contact, il est obtenu le torseur total ω appliqué par la main sur l'objet lors de la préhension :

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (2.7)$$

Et l'ensemble des torseurs applicables par la main sur l'objet lors d'une préhension est défini par :

$$W = \text{ConvexHull}(\bigcup_{i=1}^n \{W_{i1}, \dots, W_{im}\}) \quad (2.8)$$

Cette dernière équation explique que le torseur total exercé par la main sur l'objet appartient à l'ensemble défini par l'enveloppe convexe des torseurs primitifs ω_{ij} . L'enveloppe convexe du nuage de points défini par les torseurs primitifs représente l'enveloppe des torseurs applicables par la main sur l'objet.

La mesure de qualité consiste à calculer la norme du plus petit torseur situé sur la limite de l'enveloppe convexe ∂W .

$$I_{M2} = \min_{\omega \in \partial W} \|\omega\| \quad (2.9)$$

Cela équivaut à calculer la norme entre le centre de masse de l'objet et la limite de l'enveloppe convexe ∂W la plus proche. Ainsi tout torseur ayant une norme inférieure ou égale à celle retournée par la mesure sera obligatoirement contenu dans l'enveloppe convexe, quelle que soit sa direction. Cette mesure donne un indice sur la norme maximale du torseur à laquelle peut résister la préhension, peu importe sa direction. Plus cet indice est grand, plus la préhension peut résister à une perturbation externe ayant une norme importante.

2.2.2 Mesure M5 : mesure orientée action

Máximo A. Roa (2014) définissent la mesure orientée action de la manière suivante. Cette mesure utilise le même principe que la mesure M2, laquelle nécessite de calculer l'enveloppe convexe W contenant l'ensemble des torseurs applicables par la main sur l'objet lors de la préhension. M5 mesure la capacité de la préhension à résister à un ou plusieurs torseurs (efforts et/ou moments) connus. (Máximo A. Roa, 2014) définissent les torseurs externes à la préhension par l'ensemble convexe des torseurs auxquels la préhension doit résister ε . La mesure consiste à déterminer le plus grand facteur réel λ par lequel peut être multiplié ε , tel qu'il soit contenu à l'intérieur de W .

$$I_{M5} = \max_{\lambda \varepsilon \subset W, \lambda > 0} \lambda \quad (2.10)$$

Ainsi, plus le λ est grand, plus la préhension sera en mesure de résister à l'ensemble des torseurs externes à la préhension ε et meilleure sera la préhension.

2.3 Sélection des objets de test

Le domaine d'application de la présente étude cible un contexte d'entreprise industrielle. Les objets sélectionnés pour réaliser des tests sont donc des objets couramment utilisés dans l'industrie.

Trois experts du logiciel Delmia ont retenu 13 objets couramment utilisés dans l'industrie (c.f. annexe 1). Pour réduire le cas d'étude, les limites suivantes ont été posées :

- Les objets utilisés pour les tests doivent pouvoir être pris à une main.
- Les objets doivent avoir une forme différente les uns des autres.

Parmi les 13 objets, cinq remplissant les conditions ci-dessus, ont été sélectionnés pour réaliser les tests : une pince, un tournevis, un tournevis électrique, un marteau et une clé anglaise.

Tableau 2.2 - Liste des objets sélectionnés pour les tests

Numéro	Objets testés	Photo
1	Pince	
2	Tournevis	
3	Tournevis électrique	
4	Marteau	
5	Clé anglaise	

2.4 Préhensions testées

Trois préhensions par objets sont utilisées pour les tests :

- Une préhension « adaptée ».
- Une préhension « peu adaptée ».
- Une préhension « inadaptée ».




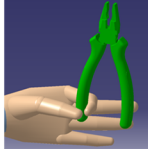

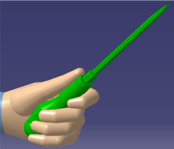














Cette catégorisation des préhensions est un peu arbitraire. La préhension qualifiée d'« adaptée », est considérée comme la préhension optimale. La préhension « peu adaptée » est une préhension possible de l'objet sans qu'elle soit privilégiée par un utilisateur expert. La préhension « inadaptée » est une préhension qu'aucun usager ne choisirait s'il souhaitait prendre l'objet.

Les règles suivantes sont respectées lors de la création des préhensions :

- La préhension « adaptée » a plus de segments de la main en contact avec l'objet que la préhension « peu adaptée ».
- La préhension « peu adaptée » a plus de segments de la main en contact avec l'objet que la préhension « inadaptée ».
- Pour chaque objet, les trois préhensions sont réalisées sur des zones différentes.

La Tableau 2.3 présente les préhensions générées sur les objets.

Tableau 2.3 - Image des 15 préhensions générées sur les 5 objets

Objets testés	Photo	Préhensions		
		Adaptée	Peu adaptée	Inadaptée
Pince				
Tournevis				
Tournevis électrique				
Marteau				
Clé anglaise				

2.5 Méthodologie de création des préhensions

Les préhensions ont été créées avec le module « Ergonomics Design & Analysis » du logiciel CATIA V5 de Dassault Systèmes. Le mannequin utilisé est un 50^{ème} percentile. Toutes les préhensions sur les objets sont réalisées avec la main gauche. La méthodologie de création des préhensions est décrite ci-après.

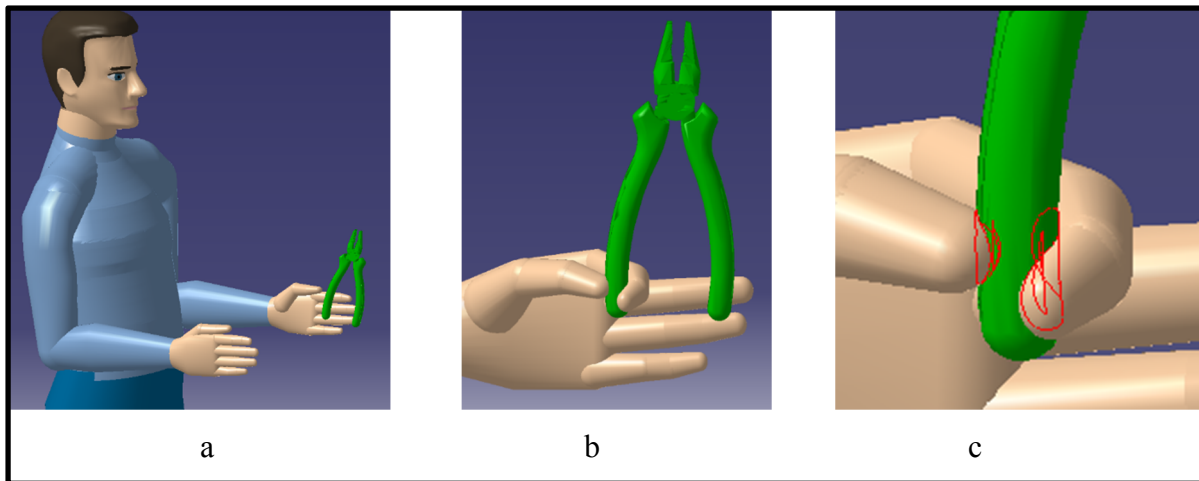


Figure 2.3 – Méthodologie de création de préhension : a – Placement du mannequin dans l'espace pour qu'il ne gêne pas le positionnement de la main sur l'objet. b – Création de la préhension. c – Vérification que les segments de la main voulus sont en contact avec l'objet.

Seule la position de la main sur l'objet est prise en compte lors de la création de la préhension. Le mannequin est positionné dans l'espace de manière à ce qu'il ne gêne pas la position de la main sur l'objet (Figure 2.3 – a). Lors de la création de la préhension, la paume de la main est déplacée, ainsi que les segments des doigts pour que la préhension soit celle que l'on souhaite (Figure 2.3 – b). Grâce à l'outil de détection de collision de CATIAV5, il y a vérification que les zones voulues de la main sont bien en contact avec l'objet (Figure 2.3 – c). Les préhensions ont été créées manuellement dans CATIA V5.

2.6 Force extérieure

Comme décrit dans le chapitre 2.2.2, la mesure M5 mesure la capacité d'une préhension à résister à un effort externe connu. Pour chaque objet, il doit être choisi un ou des efforts auxquels la préhension doit résister. Les outils sélectionnés sont utilisés dans l'industrie pour réaliser des assemblages de pièces. Les efforts qui sont appliqués sur les objets lors de leur utilisation dans l'industrie sont ceux auxquels les préhensions doivent résister lors de la mesure M5.

La partie suivante illustre les efforts auxquels doivent résister les préhensions pour chacun des objets testés.

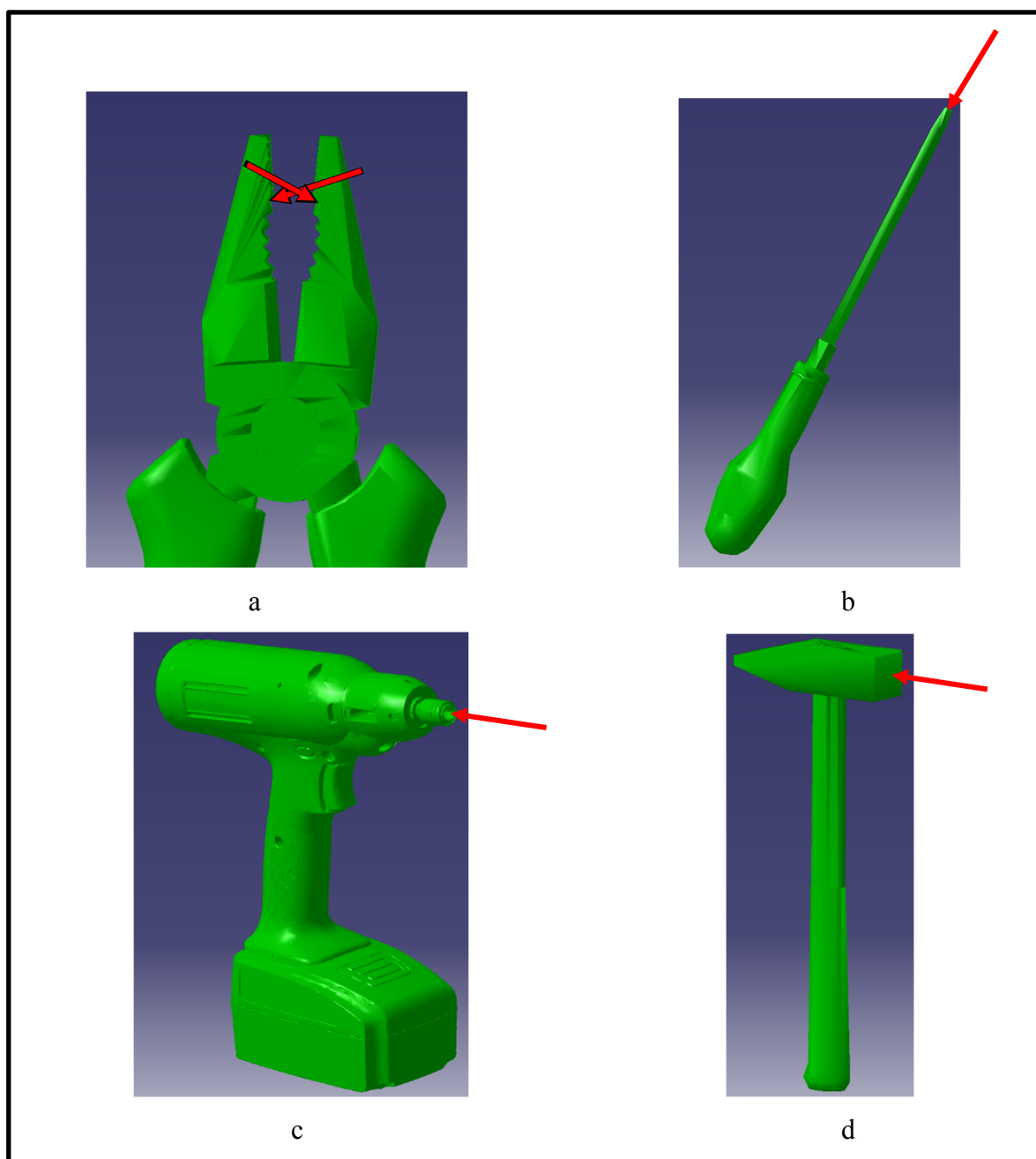


Figure 2.4 – Force(s) extérieure(s) auxquelles doivent résister les préhensions sur : a - la pince, b – le tournevis, c – le tournevis électrique, d – le marteau, e - la clé anglaise

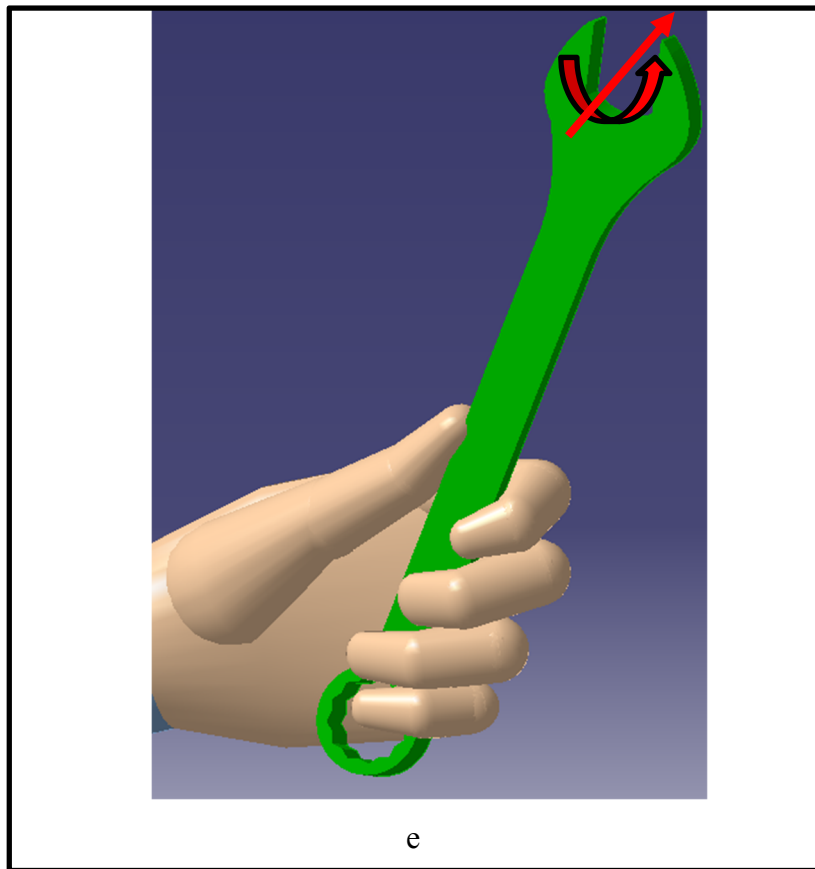


Figure 2.5 – Force(s) extérieure(s) auxquelles doivent résister les préhensions sur : a - la pince, b – le tournevis, c – le tournevis électrique, d – le marteau, e - la clé anglaise (suite)

Les préhensions réalisées sur la pince doivent résister à deux forces (figure 2.4-a). Ces efforts sont générés par l'objet lors de son serrage par la pince. L'effort externe à la préhension, appliqué sur le tournevis, correspond à un effort de poussée dans la direction de la pointe du tournevis (figure 2.4-b). L'effort externe appliqué sur le tournevis électrique est une force de poussée appliquée sur l'extrémité de la tête du tournevis électrique (figure 2.4-c). Pour le marteau, l'effort externe à la préhension est celui appliqué par un objet sur le marteau lorsqu'on tape l'objet avec la tête du marteau (figure 2.4-d). L'effort appliqué sur la clé anglaise est un couple (figure 2.4-e). C'est le couple auquel doit résister la préhension lorsque la clé anglaise est utilisée pour visser un écrou.

Les normes des efforts externes n'ont pas d'influence sur le classement des préhensions par la mesure M5. Les indices des mesures de M5 varient de manière identique en fonction de la norme de l'effort externe. Pour les tests, les efforts externes aux préhensions sont normalisés à 1 Newton.

2.7 Détermination des points de contact, de leur vecteur normal et du centre de masse de l'objet

Les mesures de qualité de préhensions M2 et M5 exigent de connaître les éléments suivants pour être appliquées :

1. La position des points de contact entre la main et l'objet.
2. La direction des vecteurs normaux à la surface de l'objet aux points de contact.
3. La position du centre de masse de l'objet

Dans notre étude, les surfaces de contact entre la main et l'objet sont simplifiées sous forme de points de contact.

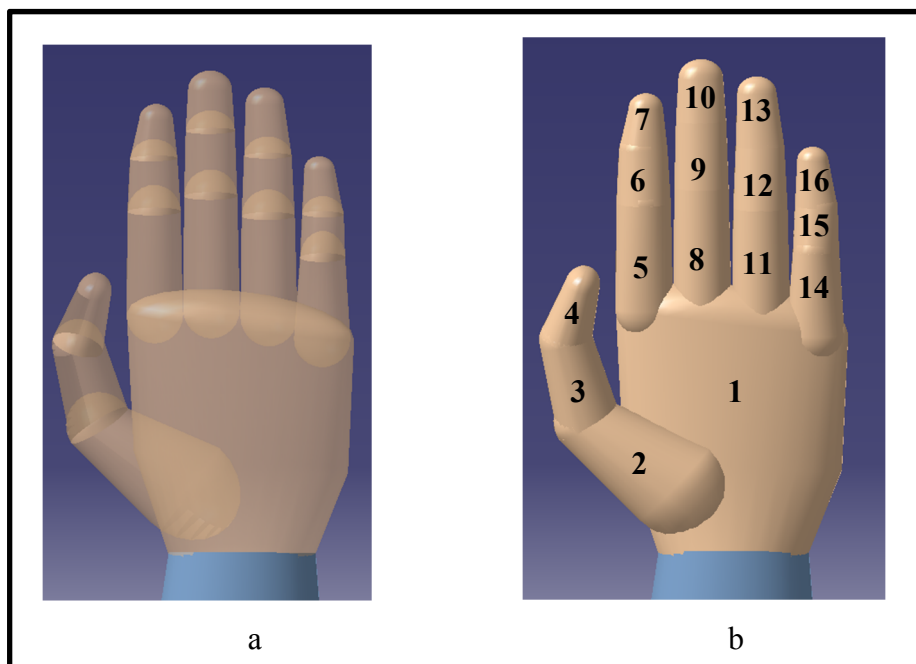


Figure 2.6 - a - modèle de la main gauche du mannequin de CATIA V5 avec les segments de la main en transparence.
b - Modèle de la main gauche du mannequin de CATIA V5 utilisé pour les tests avec la segmentation numérotée choisie

Les figures 2.5 - a et 2.5 - b présentent la main du mannequin virtuel de CATIA V5. La figure 2.5 - a - permet de voir les 16 segments différents de la main en transparence :

- un pour chaque phalange,
- un pour la paume de la main,
- un pour le métacarpe du pouce.

Lors des tests, un point de contact est choisi par segment de la main en contact avec l'objet, soit un total de 16 points de contact au maximum.

Le positionnement des points de contact sur l'objet est présenté figure 2.6.

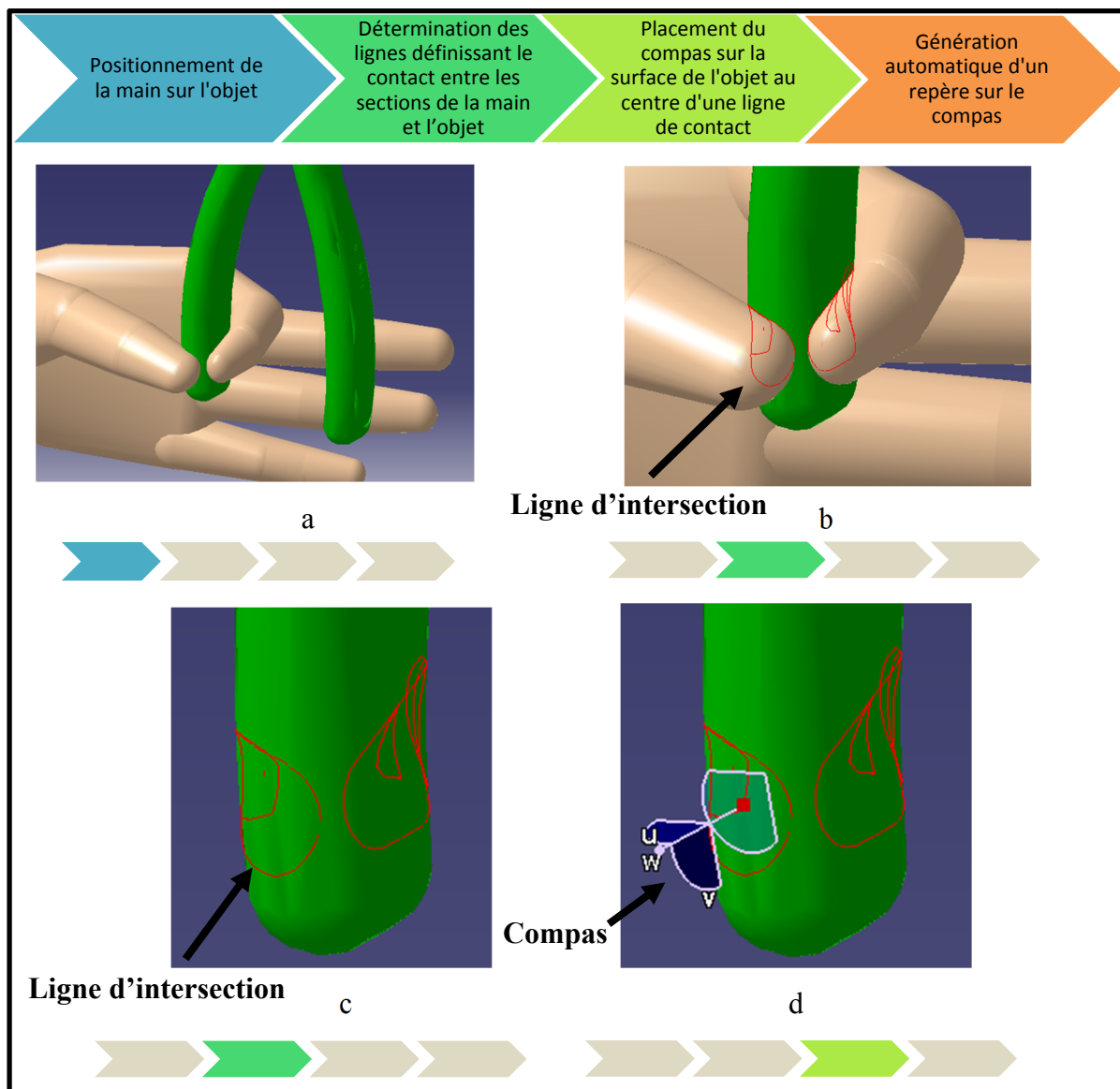


Figure 2.7 – Illustration et méthodologie de placement des points de contact et de la détermination des vecteurs normaux.

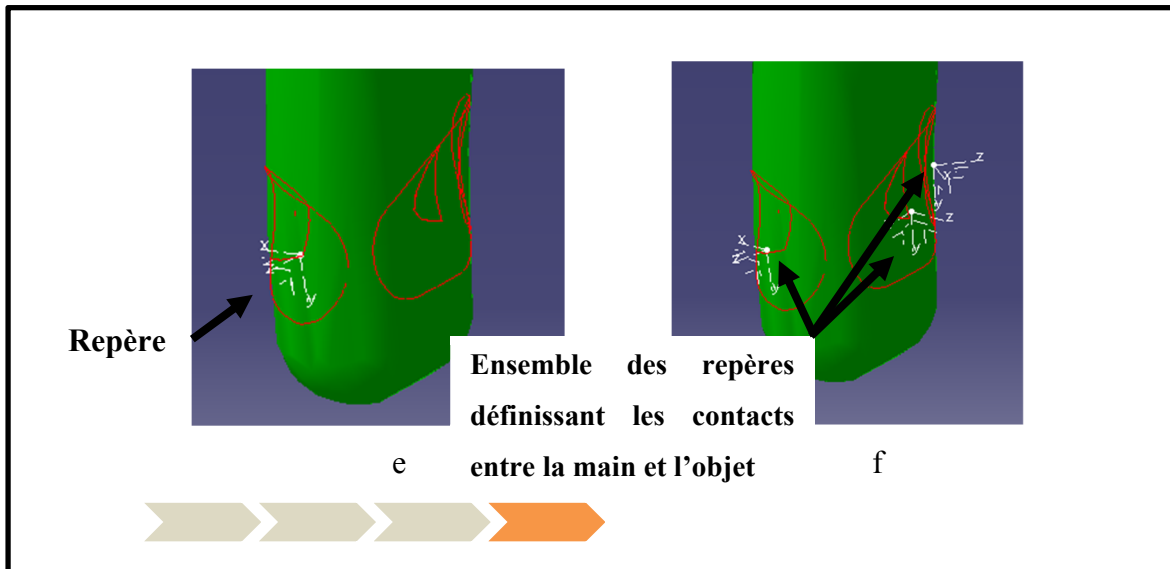


Figure 2.8 – Illustration et méthodologie de placement des points de contact et de la détermination des vecteurs normaux. (suite)

L'exemple de la préhension « inadaptée » sur la pince de la figure 2.6 – a permet de décrire la méthodologie de placement des points de contact. L'outil de détection de collisions de CATIA V5 est utilisé pour déterminer les lignes d'intersection entre la main et l'objet (figures 2.6 – b et c). Chaque section de la main en contact avec l'objet définit une ligne d'intersection. Le nombre de sections de la main en contact avec l'objet est alors connu. Le placement du point de contact se fait de manière manuelle. Le compas de CATIA V5 est déplacé manuellement sur la surface de l'objet pour qu'il soit situé approximativement au centre d'une ligne définissant le contact entre une section de la main et l'objet (figure 2.6 – d). Ensuite un repère est généré automatiquement d'après la position du compas (figure 2.6 – e). Le processus est réitéré pour chaque section de la main en contact avec l'objet (figure 2.6 – f). L'origine de chaque repère est la position du point de contact pour le segment de la main considéré. Le vecteur « z » de chaque repère est le vecteur normal à la surface de l'objet au niveau du point de contact. Les coordonnées du centre du repère et du vecteur z sont calculées par rapport au repère global du système. Ces coordonnées sont extraites pour chaque point de contact. Pour chaque préhension la position des points de contact et les coordonnées du vecteur normal en chaque point sont connues.

2.8 Incertitude sur les mesures

Cette section détaille la méthodologie utilisée pour déterminer l'erreur lors du calcul des mesures M2 et M5.

2.8.1 Indice de la mesure M5

Il n'existe pas de moyen de connaître la valeur exacte de l'indice donnée par M5. Pour rappel, la mesure M5 consiste à déterminer le plus grand facteur réel λ par lequel peut être multiplié un torseur d'effort externe à la préhension ε tel que la préhension puisse résister à $\lambda\varepsilon$:

$$I_{M5} = \max_{\lambda\varepsilon \subset W, \lambda > 0} \lambda \quad (2.11)$$

Pour calculer la valeur maximale de λ , une méthode d'encadrement de la valeur est utilisée. A l'aide de la fonction « inhull » de Matlab, il est possible de savoir si : $\lambda\varepsilon \subset W$. Un premier encadrement de λ est donc recherché en définissant deux coefficients a et b tels que :

$$a\varepsilon \subset W \quad \text{et} \quad b\varepsilon \not\subset W \quad (2.12)$$

λ se situe alors dans l'intervalle $[a; b]$. L'incertitude sur la mesure est donnée par : $b - a$. Pour déterminer ce premier intervalle, on part d'une valeur de $a = 0,5$ et $b = 1$. Si a et b sont inclus dans W alors a et b sont multipliés par 2, jusqu'à ce que $a\varepsilon \subset W$ et $b\varepsilon \not\subset W$. Si a et b ne sont pas inclus dans W alors a et b sont divisés par deux, jusqu'à ce que $a\varepsilon \subset W$ et $b\varepsilon \not\subset W$. Lorsque le premier intervalle est trouvé, plusieurs itérations divisant par deux l'intervalle entre a et b sont réalisées tout en garantissant que $a\varepsilon \subset W$ et $b\varepsilon \not\subset W$. Pour avoir les mesures les plus précises possible, l'intervalle entre a et b doit être le plus petit possible.

L'incertitude de notre mesure peut être connue, sachant que l'intervalle entre a et b est divisé par deux à chaque itération. Il est aisé, à partir de la valeur d'origine de l'intervalle

d'incertitude et du nombre d'itérations, d'obtenir l'intervalle d'incertitude. La précision de la mesure est donnée par l'équation suivante :

$$Incertainde = \frac{Intervalle\ de\ départ}{2^n} \quad (2.13)$$

Avec n : le nombre d'itérations de la division par deux de l'intervalle entre a et b .

Pour connaître la précision minimale des mesures, le plus grand intervalle de départ résultant des mesures est retenu. La plus grande valeur de λ obtenue lors de nos mesures est $\lambda = 46,35$. Les valeurs minimale et maximale de l'intervalle de départ sont $[2^5; 2^6] = [32; 64]$ car $46,35$ est compris entre 32 et 64 . L'intervalle de départ est donc égal à : $64 - 32 = 32$. Ainsi l'incertitude de nos mesures sera au maximum :

$$Incertainde = \frac{32}{2^n} = \frac{2^5}{2^n} = \frac{1}{2^{n-5}} \quad (2.14)$$

Le tableau suivant montre l'évolution de l'intervalle d'incertitude en fonction du nombre d'itérations utilisé pour calculer λ .

Tableau 2.4 - Évolution de l'incertitude sur la mesure M5 en fonction du nombre d'itérations utilisé pour la calculer

Nombre d'itérations	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Intervalle d'incertitude	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,13	0,063	0,031

Nombre d'itérations	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Intervalle d'incertitude	0,016	0,0078	0,0039	0,0020	0,00098	0,00049	0,00024	0,00012	6,1E-05	3,1E-05

A partir de 12 itérations, l'intervalle d'incertitude est inférieur à 10^{-3} . Dans notre cas d'étude, 20 itérations permettent d'approximer les mesures de M5 et de donner un intervalle d'incertitude inférieur à 10^{-4} .

2.8.2 Discrétisation des cônes de friction

Les cônes de friction au point de contact sont approximés lors du calcul des mesures M2 et M5, comme décrit dans le chapitre 2.2.1, (Figure 2.7).

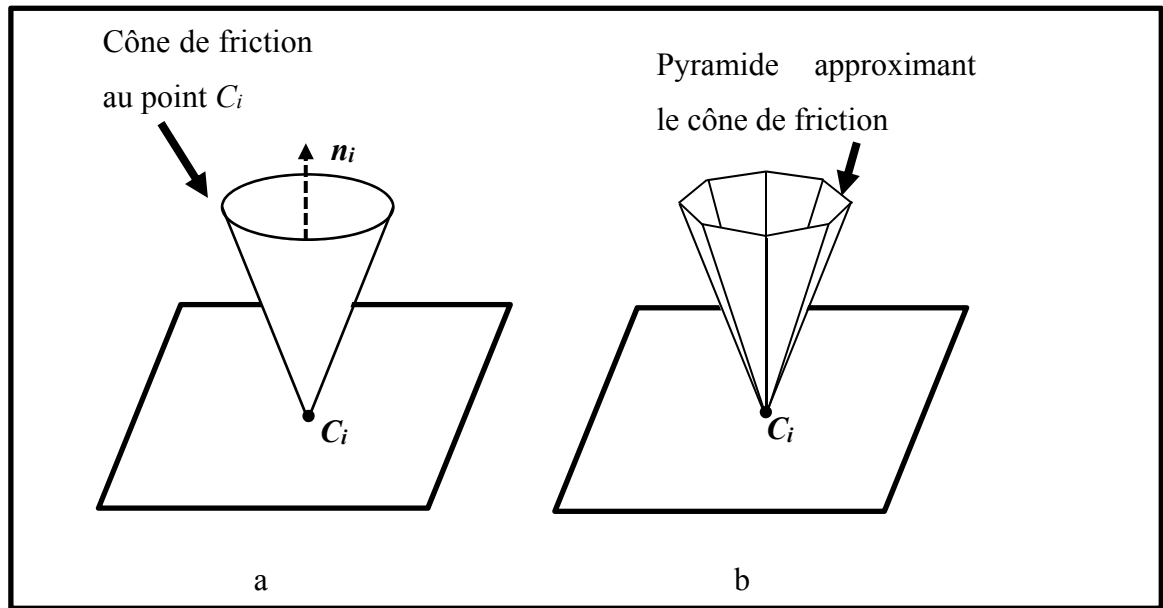


Figure 2.9 – a – représentation du cône de friction au point de contact C_i .
 b – Discrétisation du cône de friction en une pyramide à n facettes.

Cette approximation du cône de friction entraîne une erreur lors de la mesure de M2 et M5. Plus le nombre de facettes approximant le cône de friction est grand, meilleure est la précision de la mesure, car plus la pyramide se rapproche de la forme du cône de friction. Cependant, plus le nombre de facettes par cône de friction augmente, plus le temps de calcul des mesures M2 et M5 est grand. L'objectif est de connaître la variation des indices donnés par les mesures, en fonction du nombre de facettes utilisé pour approximer le cône de friction. Pour cela, il sera étudié la variation de l'indice donnée par la mesure M2 en fonction du nombre de facettes utilisé. La mesure M2 est utilisée car elle calcule la norme exacte du vecteur le plus proche entre le centre de masse de l'objet et l'enveloppe convexe définie par le point de contact entre la main et l'objet. Contrairement à la mesure M5 dont la valeur exacte de l'indice n'est pas connue.

2.9 Étude de la variation des indices

La variation des indices des mesures M2 et M5 en fonction de certains paramètres est étudiée. Cette section détaille la méthodologie utilisée pour faire varier :

1. Le coefficient de friction aux points de contact
2. Les forces maximales par phalange
3. La position du centre de masse de l'objet

2.9.1 Modification du coefficient de friction

Comme énoncé dans la revue de littérature, le coefficient de frottement de la peau humaine peut varier de 0.5 à 1.5 (Derler & Gerhardt, 2012). L'objectif est de connaître l'influence du coefficient de friction sur les indices retournés par les mesures M2 et M5. Des tests vont donc être réalisés en faisant varier ce coefficient entre 0.5 et 1.5 par pas de 0.1 et en observant la variation des indices des mesures M2 et M5.

2.9.2 Modification des forces maximales par phalange

Lors de la formulation des mesures M2 et M5, l'hypothèse originale est que les forces normales maximales applicables en chaque point de contact sont égales à 1. Cette hypothèse, cohérente en robotique, l'est moins lorsqu'un humain prend un objet. L'influence des forces maximales par phalange sur les indices donnés par les mesures de qualité de préhension va être étudiée. Pour rappel, les préhensions sont simplifiées en ne prenant qu'un point de contact pour chaque phalange en contact avec l'objet.

Dans un premier temps, les mesures de qualité de préhension seront utilisées telles que décrites dans la littérature. L'hypothèse suivante sera utilisée : les phalanges de la main ont une force applicable maximale identique et normalisée à 1.

Dans un second temps les forces normales maximales par phalange seront utilisées telles que mesurées par (Enders & Seo, 2011).

Tableau 2.5 – Force normale maximale appliquée par chaque phalange en Newton (Enders & Seo, 2011).

	Phalange		
	Distale	Médiale	Proximale
Pouce	44,1		25,9
Index	37,9	18,1	18,4
Majeur	35,9	21,5	25,3
Annulaire	25,7	15,9	15,1
Auriculaire	17,8	14,7	8,1

Cependant, dans le tableau 2.5, il n'y a pas de force maximale pour la paume de la main et pour la phalange médiale (intermédiaire) du pouce. La paume de la main n'étant pas une phalange de la main, il n'est pas possible de mesurer la force qu'elle peut appliquer lors d'une préhension. Dans ce mémoire, il est considéré que, lors de la préhension d'objet, la paume de la main ne sert qu'à contrer les efforts appliqués par les phalanges distales des autres phalanges. Ainsi la force maximale applicable par la paume de la main correspond à la somme des forces maximales applicables par toutes les phalanges distales des doigts, soit 161,4 Newton.

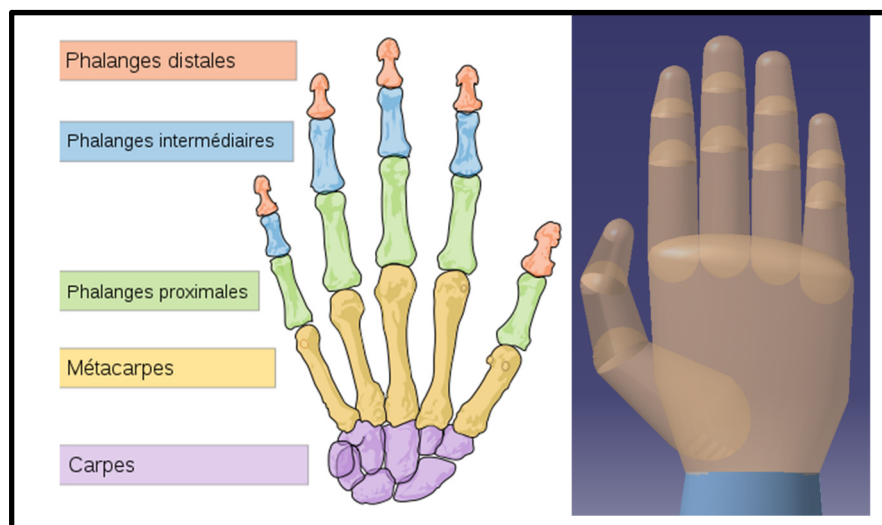


Figure 2.10 – Représentation des différentes phalanges de la main ainsi que des carpes et métacarpes
(image : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Phalange_\(os\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Phalange_(os))).

La force maximale applicable par le métacarpe du pouce n'a pas été mesurée par (Enders & Seo, 2011). Cependant le métacarpe du pouce joue un rôle durant la préhension, car il est amovible et peut appliquer une force sur l'objet. Dans notre étude, on lui attribue la force maximale du métacarpe du pouce, soit la même valeur que pour la phalange proximale du pouce. Cette décision est dictée par les mesures de (Enders & Seo, 2011) qui montrent que la force maximale des phalanges proximales et de l'index, du majeur et de l'annulaire, ont approximativement la même valeur. Il est supposé que cette relation se vérifie entre le métacarpe du pouce et la phalange proximale du pouce.

2.9.3 Déplacement du centre de masse de l'objet

L'outil de calcul de centre géométrique des pièces de CATIA V5 est utilisé pour déterminer le centre de masse des objets utilisés pour les tests. Cette méthode de calcul de centre de masse est appropriée lorsque les outils sont constitués d'un matériau uniforme et que la masse de l'objet est uniformément répartie dans celui-ci. Dans ce mémoire il est considéré que la pince, le tournevis et la clé anglaise ont une répartition uniforme de la masse, permettant ainsi de confondre le centre géométrique de ces objets avec leur centre de masse. Cette hypothèse ne peut pas être appliquée au tournevis électrique et au marteau ; la masse du premier outil étant principalement localisée dans sa tête et dans sa batterie et celle du second principalement dans sa tête.

Pour observer l'influence du positionnement du centre de masse de l'objet sur les indices des mesures M2 et M5. Le marteau et le tournevis électrique sont utilisés avec les préhensions de la tableau 2.3. Dans un premier temps, les indices des deux mesures sont calculés, en considérant le centre géométrique de l'objet comme centre de masse. Dans un second temps, les indices des mesures M2 et M5 sont calculés en prenant un centre de masse plus proche de la réalité. La section suivante explique la méthodologie de détermination de la localisation approximée du centre de masse pour le tournevis électrique et le marteau.

2.9.3.1 Pour le tournevis électrique

La figure 2.9 montre la position du centre géométrique du tournevis électrique.

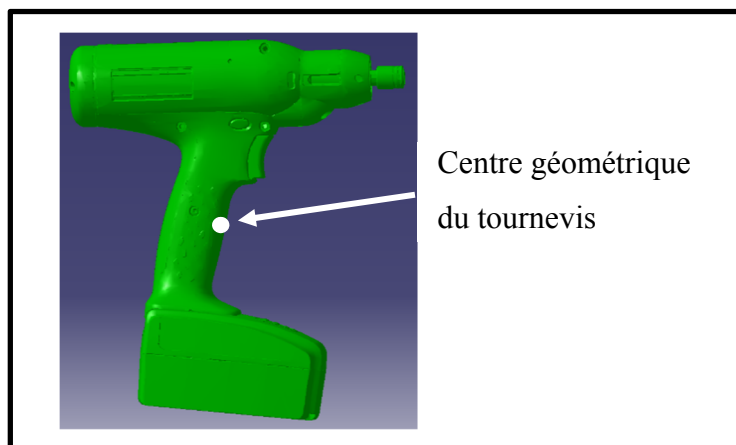


Figure 2.11 - Position du centre géométrique du tournevis électrique

Pour déterminer le centre de masse du tournevis électrique, sa tête et sa batterie sont isolées. Il est considéré que ce sont les deux zones où est concentrée la masse de l'objet (figure 2.10).

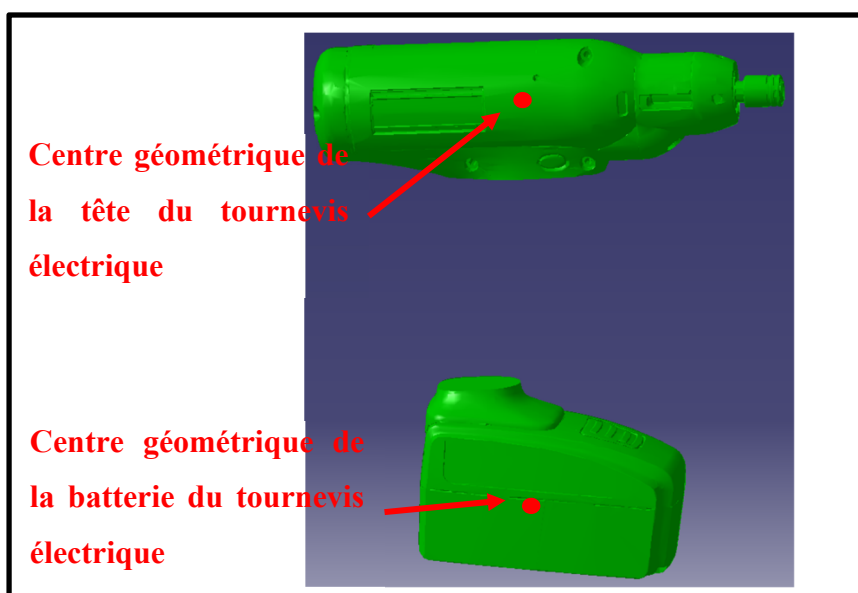


Figure 2.12 – Isolation de la batterie et de la tête du tournevis électrique et détermination du centre géométrique des deux parties isolées

Il est supposé que la masse est répartie de manière uniforme dans la tête du tournevis électrique et de la batterie. Le centre de masse de ces deux parties est égal à leur centre géométrique. Le centre géométrique des deux parties isolées données par CATIA V5 est utilisé.

Pour calculer le centre de masse de l'objet, il faut calculer le barycentre du centre géométrique de la tête du tournevis électrique et de sa batterie. La masse réelle des deux parties isolées n'est pas connue. Lorsqu'un poids identique est attribué aux deux parties isolées, le centre de masse de l'objet est très proche du centre géométrique. Afin d'avoir un écart plus important entre le centre géométrique et le centre de masse de l'objet, il est supposé que la tête du tournevis électrique est deux fois plus lourde que la batterie. La position du centre de masse approximé est montrée figure 2.11.

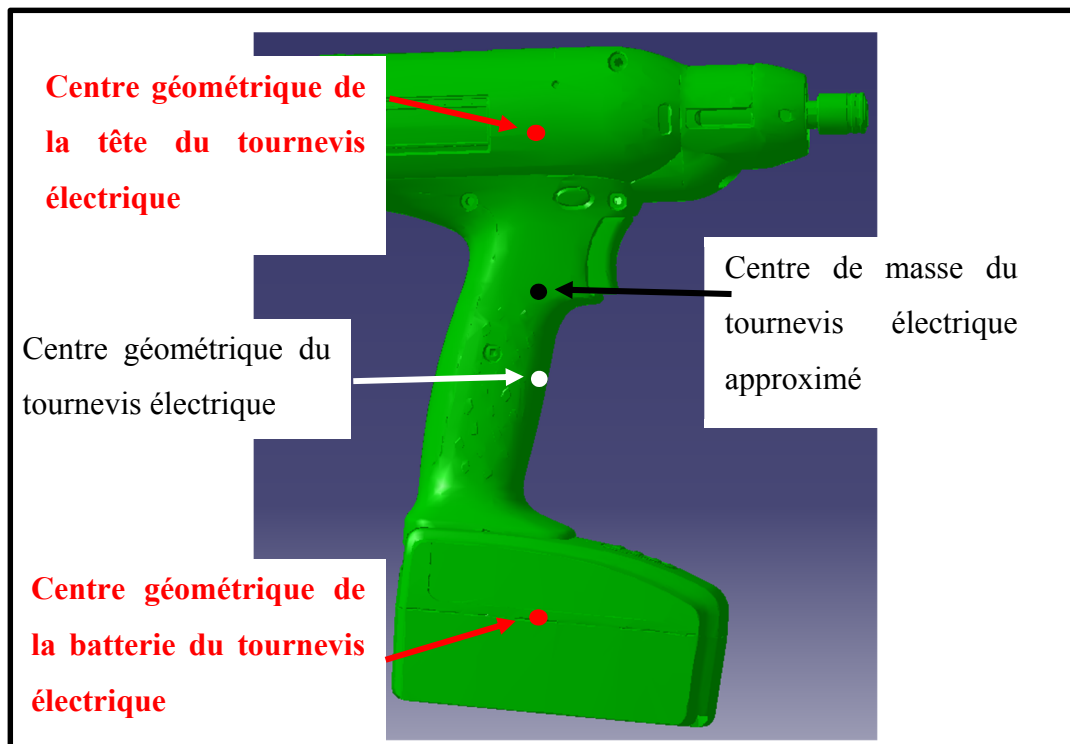


Figure 2.13 – Position du centre de masse approximé du tournevis électrique

2.9.3.2 Pour le marteau

Pour le marteau, la tête du marteau et le manche sont séparés. CATIA V5 donne la position du centre géométrique et du volume des deux parties isolées. Il est supposé que la masse de la tête et du manche du marteau sont équitablement réparties. Le centre de masse des sections est donc confondu avec leur centre géométrique. Il est considéré que la tête du marteau est en acier et que le manche est en frêne. Le volume et la densité des deux parties isolées sont connus, leurs poids respectifs peuvent alors être calculés.

Tableau 2.6 – Tableau du calcul des masses respectives de la tête et du manche du marteau

	Marteau	
	Tête	Manche
Volume (m3)	0,00014	0,00015
Densité (kg/m3)	8050	830
Masse (Kg)	1,16	0,123

Le barycentre entre la tête et le manche du marteau est calculé, avec un poids de 1.16 pour la tête du marteau et un poids de 0.123 pour le manche. La figure 2.12 montre la position des différents centres géométriques et du centre de masse approximé pour le marteau.

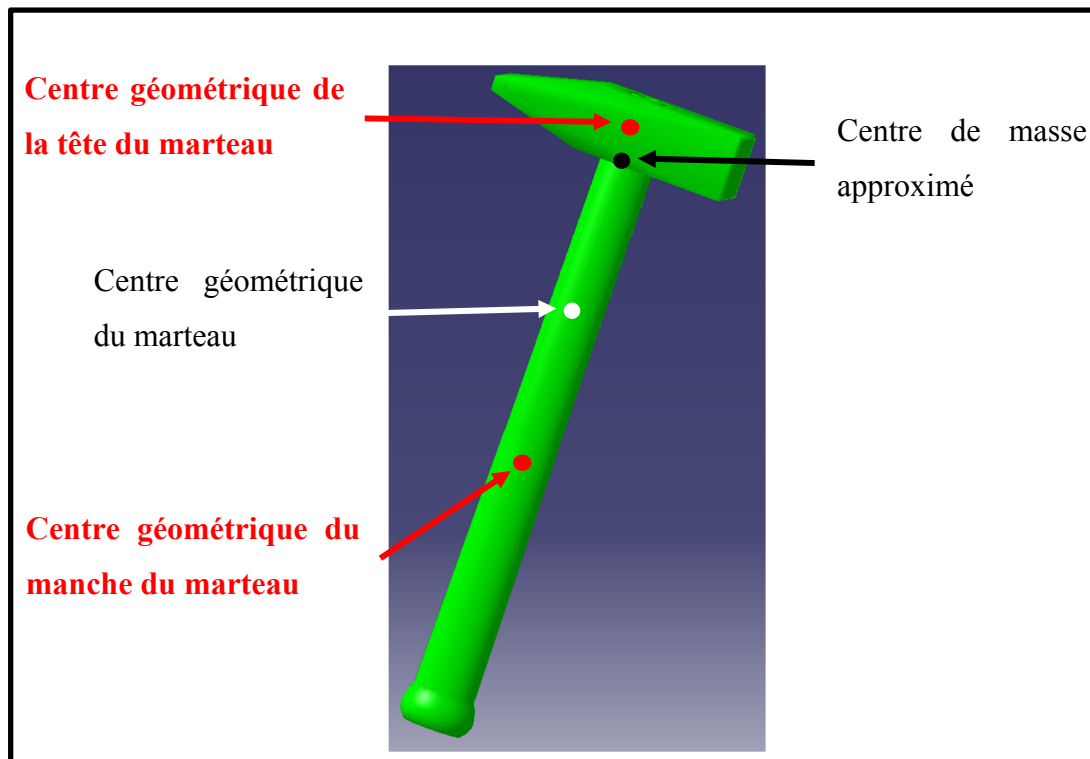


Figure 2.14 – Position : du centre géométrique du marteau, du centre géométrique de la tête et du manche du marteau, du centre de masse approximé.

CHAPITRE 3

RESULTATS

3.1 Variation des indices en fonction de la discrétisation du cône de friction et des préhensions

Ce chapitre présente :

1. L'influence, sur les indices de la mesure M2, du nombre de facettes utilisé pour approximer les cônes de friction. Cette influence sur les indices de M2 permettra de déterminer le nombre de facettes qui sera utilisé pour approximer les cônes de friction lors des tests.
2. La variation des indices en fonction des préhensions testées.

3.1.1 Variation des indices M2 en fonction de l'approximation des cônes de friction

Cette partie présente l'influence, sur l'indice M2, du nombre de facettes retenu pour approximer les cônes de friction. Le détail des valeurs des indices donnés par M2 en fonction du nombre de facettes des pyramides approximant les cônes de friction est présenté en annexe 2. La figure 3.1 montre l'évolution de l'indice donné par M2 pour la préhension « adaptée » du tournevis électrique.

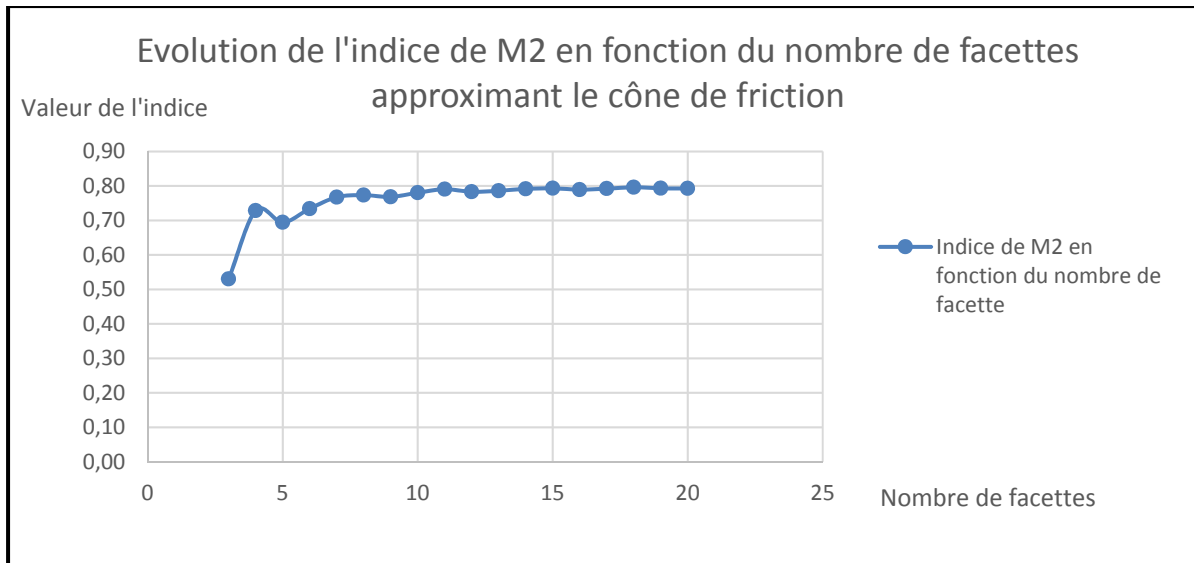


Figure 3.1 – Courbe montrant l'évolution de l'indice de M2 en fonction du nombre de facettes approximant le cône de friction pour la préhension « adaptée » du tournevis électrique.

La courbe de la figure 3.1 montre que les indices de M2 pour la préhension « adaptée » du tournevis électrique tendent vers une valeur d'environ 0,8 lorsque le nombre de facettes approximant le cône de friction augmente. Pour un cône de friction approximée avec trois facettes, la valeur de l'indice est largement inférieure à la valeur de 0,8 pour une approximation à vingt facettes. Sur la figure 3.1, lorsque le nombre de facettes augmente, la valeur des indices varie de moins en moins par rapport à la valeur immédiatement précédente. Cette tendance de regroupement et de faible variation des valeurs autour d'une valeur asymptotique obtenue pour un nombre de facettes élevé se vérifie avec les autres préhensions testées (annexe 2).

La dérivée des valeurs des indices en fonction du nombre de facettes utilisé permet d'étudier la variation des indices des mesures. L'écart des indices de M2 est calculé entre les cônes de friction approximés avec N facettes et les cônes approximés avec N-1 facettes. L'écart des indices des mesures est ensuite divisé par la valeur de l'indice pour l'approximation du cône avec N facettes. Cela permet d'évaluer le pourcentage de la variation de l'indice par rapport à sa valeur. Les résultats sont présentés annexe 3. La figure 3.2 montre la variation des indices

de M2 en fonction du nombre de facettes utilisé pour approximer les cônes de friction pour la préhension « adaptée » du tournevis électrique.

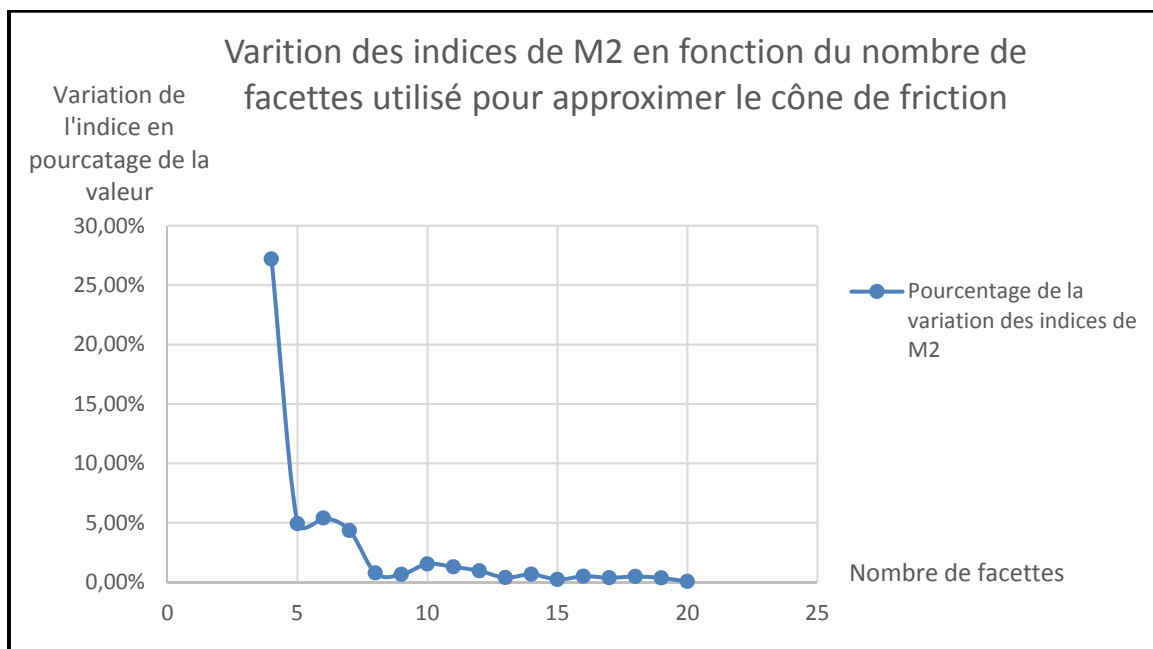


Figure 3.2 - Courbe montrant la variation des indices de M2 par rapport à la valeur de l'indice précédente. La variation des indices est exprimée en pourcentage de la valeur de l'indice.

La variation de l'indice diminue lorsque l'on augmente le nombre de facettes utilisé pour approximer le cône de friction. La variation de l'indice atteint 30 % de sa valeur lorsqu'on approxime le cône de friction avec quatre facettes. Les données de l'annexe 3 montrent qu'à partir de dix facettes, la variation des indices est inférieure à 3 % de la valeur des indices pour toutes les préhensions testées. En utilisant vingt facettes, la variation des indices ne dépasse pas 1% de leur valeur.

Pour la suite des tests, 20 facettes seront utilisées pour approximer chaque cône de friction.

3.1.2 Variation des indices en fonction des préhensions

Ce chapitre présente l'étude de la variation des indices des mesures M2 et M5 en fonction des préhensions. Il décrit également l'analyse du classement des préhensions par les mesures M2 et M5. Le classement attendu est le suivant : indice préhension « adaptée » > indice préhension « peu adaptée » > indice préhension « inadaptée ».

Les mesures M2 et M5 sont appliquées avec les éléments suivants : les forces normales maximales applicables par phalange sont identiques pour toutes les phalanges et normalisées à 1. Les cônes de friction aux points de contact ont un coefficient de friction égal à un. Les résultats obtenus sont donnés tableau 3.1.

Tableau 3.1 - Valeur des indices des mesures M2 et M5 pour une modélisation du contact uniforme sur toute la main et un coefficient de friction égal à un.

		Indice des mesures	
Objet	Préhension	M2	M5
Pinces	Adaptée	0,88	0,40
	Peu adaptée	0,39	0,27
	Inadaptée	0,016	0,0065
Tournevis	Adaptée	0,71	1,1
	Peu adaptée	0,27	1,0
	Inadaptée	0,17	0,94
Tournevis électrique	Adaptée	0,79	0,49
	Peu adaptée	0,24	0,99
	Inadaptée	0	0
Marteau	Adaptée	0,19	0,13
	Peu adaptée	0,18	0,99
	Inadaptée	0	0
Clé anglaise	Adaptée	0,51	46,35
	Peu adaptée	0,10	37,72
	Inadaptée	0	0
	Classement attendu		
	Préhension adaptée classée en première		
	Classement non conforme aux attentes		

Les indices de la mesure M2 décroissent de manière importante entre les préhensions « adaptée », « peu adaptée » et « inadaptée », à l'exception du marteau où les préhensions « adaptée » et « peu adaptée » ont des valeurs d'indices très proches : 0.19 et 0.18. Les préhensions « inadaptée » du tournevis électrique, du marteau et de la clé anglaise ont une valeur de 0. Cela signifie que le centre de masse de l'objet n'est pas inclus dans l'enveloppe convexe définie par les torseurs de la main sur l'objet. Cela implique qu'il existe au moins un torseur d'effort extérieur à la préhension de norme presque nulle auquel la préhension ne peut pas résister. La préhension n'est donc pas stable. L'ordre de classement de préhensions données par les indices de la mesure M2 est celui attendu : indice préhension « adaptée » > indice préhension « peu adaptée » > indice préhension « inadaptée ».

Le classement des indices de la mesure M5 est celui attendu pour la pince, le tournevis et la clé anglaise. Pour la mesure M5, les indices des préhensions sur le marteau sont très proches : 1.1 pour la préhension « adaptée », 1 pour la préhension « peu adaptée » et 0.94 pour la préhension « inadaptée ». Les valeurs des indices de M5 pour la clé anglaise sont supérieures aux indices des autres objets. La clé anglaise est le seul objet dont les préhensions doivent résister à un couple et non une force. Dans cette étude, le couple est calculé en Newton millimètre (N.mm). La distance entre les points de contact et le centre de masse de l'objet étant supérieure à un millimètre, il est logique que les indices de M5 soient plus grands pour cet objet que pour les autres.

Pour le tournevis électrique et le marteau, M5 donne une valeur d'indices plus grande pour les préhensions « peu adaptée » que pour les préhensions « adaptée », de plus l'écart entre les valeurs des indices des deux préhensions est important. Pour le Tournevis électrique, la préhension « peu adaptée » a une valeur d'indices deux fois plus grande que la préhension « adaptée ». Pour le marteau, l'indice de M5 pour la préhension « peu adaptée » est plus de 7 fois supérieur à la préhension « adaptée ».

3.2 Variation des indices en fonction de paramètres physique

Cette partie présente la variation des indices des mesures M2 et M5 en fonction des paramètres suivants :

1. Le coefficient de friction aux points de contact.
2. Les forces normales maximales applicables par les phalanges de la main.
3. La position du centre de masse de l'objet.

3.2.1 Modification du coefficient de friction

Ce chapitre présente l'étude de l'influence du coefficient de friction utilisé pour définir le cône de friction sur les indices des mesures M2 et M5. Le coefficient de friction varie de 0,5 à 1,5 par pas de 0,1. Les résultats sont présentés annexe 4.

La figure 3.3 trace l'évolution des indices de M2 et M5 en fonction du coefficient de friction utilisé pour la préhension « adaptée » du Tournevis électrique.

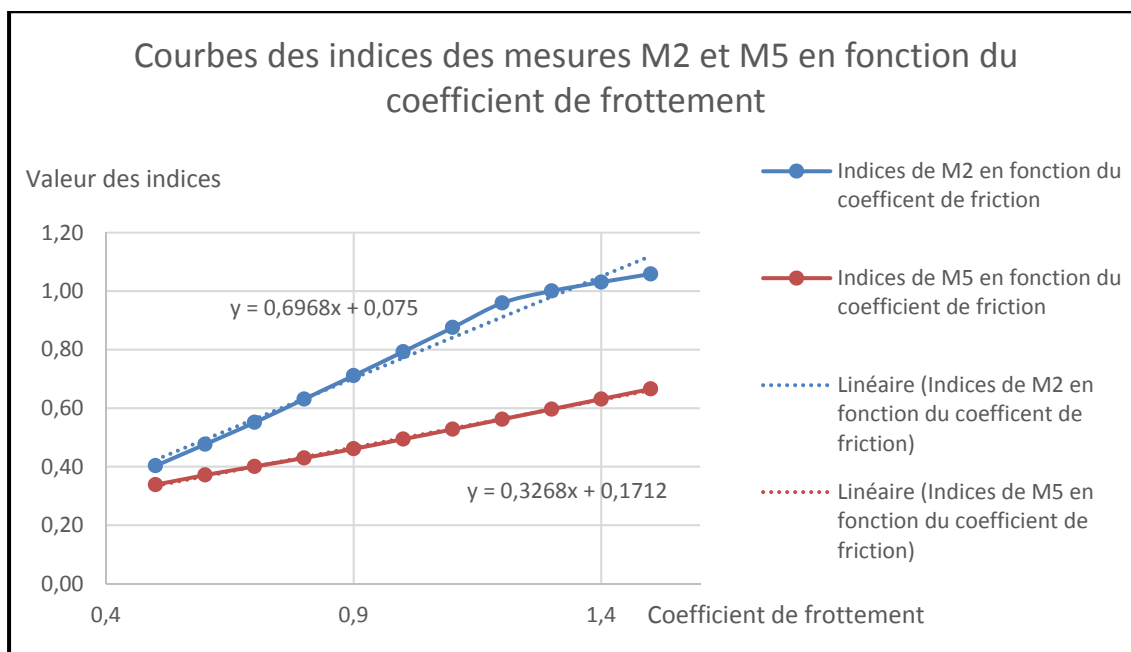


Figure 3.3 – Courbe des indices de M2 et M5 en fonction du coefficient de friction utilisé pour la préhension « adaptée » du Tournevis électrique

Sur la figure 3.3, les courbes des indices de M2 et M5 varient de manière quasiment linéaire en fonction du coefficient de frottement. Les courbes des indices sont approximées par une équation de droite de la forme : $ax + b$, avec x les coefficients de friction et a et b les coefficients de la droite. L'annexe 4 – b donne les valeurs des coefficients a et b . Les coefficients de corrélation entre la courbe des indices et de la droite l'approximant sont tous très proches de 1. Cela signifie que pour un coefficient de friction compris entre 0,5 et 1,5, les indices varient de manière presque linéaire.

Les valeurs des coefficients de la droite a , de l'annexe 4 – b, sont différentes selon les préhensions. Les indices varient de manière linéaire en fonction du coefficient de friction, mais ils ne varient pas à la même vitesse. En fonction des préhensions, les indices augmentent de manière plus ou moins importante. L'annexe 4-a montre que le coefficient de friction utilisé peut affecter le classement des préhensions données en fonction des indices des mesures de qualité de préhension. Pour le marteau, un coefficient de friction de 0,5, amène la mesure M2 à classer les préhensions comme attendu. Cependant, l'augmentation du coefficient de friction entraîne la diminution de l'écart entre les indices de M2 pour les préhensions « adaptées » et « peu adaptées ». Finalement, avec un coefficient de 1,5, la préhension « peu adaptée » a un indice donné par M2 plus grand que la préhension « adaptée ». Le classement des préhensions est donc affecté par le coefficient de friction.

Pour M5, les indices varient différemment selon les préhensions, cependant, le classement des préhensions n'est pas modifié par la variation des coefficients de friction.

3.2.2 Modification des forces maximales par phalange

Cette section présente l'étude de la variation des indices donnés par M2 et M5 lors de la prise en compte des forces maximales réelles d'une main humaine lors d'une préhension. Les forces normales maximales par phalange utilisées pour les tests sont celles mesurées par (Enders & Seo, 2011). Les forces normales maximales mesurées par (Enders & Seo, 2011) sont appelé modélisation réaliste du contact dans ces tests. L'autre modélisation des forces

utilisée est appelée modélisation uniforme des forces, car dans cette modélisation on considère que les forces maximales par phalange sont uniformes sur toute la main et normalisée à 1. Les résultats sont présentés tableau 3.2. Pour ces tests, le coefficient de friction utilisé est égal à un.

Tableau 3.2 - Valeur des indices de M2 et M5 avec des forces normales maximales par phalange qu'un humain peut appliquer.

		Indice des mesures	
Objet	Préhension	M2	M5
Pinces	Adaptée	26,1	10,1
	Peu adaptée	10,1	8,2
	Inadaptée	0,57	0,24
Tournevis	Adaptée	16,6	43,5
	Peu adaptée	5,6	40,6
	Inadaptée	7,5	43,2
Tournevis électrique	Adaptée	35,6	11,0
	Peu adaptée	5,5	33,4
	Inadaptée	0	0
Marteau	Adaptée	4,6	3,2
	Peu adaptée	5,9	50,0
	Inadaptée	0	0
Clé anglaise	Adaptée	9,8	2106,1
	Peu adaptée	6,3	252,2
	Inadaptée	0	0
	Classement attendu		
	Préhension adaptée classée en première		
	Classement non conforme aux attentes		

Le classement des indices reste identique à celui d'une modélisation uniforme du contact, excepté pour le tournevis où, pour M2 et M5, la préhension « inadaptée » a un indice supérieur à la préhension « peu adaptée ».

Afin de mieux observer comment les mesures varient en fonction de la modélisation, chaque valeur d'indice obtenue avec une modélisation du contact réaliste est divisée par l'indice obtenu avec une modélisation du contact uniforme (tableau 3.3 – a). Tous les indices ont subi

une augmentation de leur valeur lors de l'utilisation de la modélisation réaliste du contact. Au minimum la mesure M2 a été multipliée par 19 lors de l'utilisation de la modélisation réaliste du contact. Au maximum, M2 a été multiplié par 44,9. M5 a été multiplié au minimum par 22,2 et au maximum par 50,3. La variation des indices entre la modélisation uniforme du contact et la variation réaliste est inégale.

Tableau 3.3 - a - Tableau du rapport entre les indices obtenus avec une modélisation réaliste du contact et les indices obtenus avec une modélisation uniforme du contact.
b – Traitement statistique des valeurs du tableau 3.3 – a.

		Variation des indices				
Objet	Préhension	M2	M5			
Pincés	Adaptée	29,5	25,1			
	Peu adaptée	26,2	30,2			
	Inadaptée	36,6	36,7			
Tournevis	Adaptée	23,3	39,4			
	Peu adaptée	21,0	40,6			
	Inadaptée	44,8	45,7			
Tournevis électrique	Adaptée	44,9	22,2			
	Peu adaptée	22,9	33,7			
	Inadaptée	0	0			
Marteau	Adaptée	23,9	24,9			
	Peu adaptée	32,4	50,3			
	Inadaptée	0	0			
Clé anglaise	Adaptée	19,0	45,4			
	Peu adaptée	63,0	6,7			
	Inadaptée	0	0			
a				b		
					M2	M5
				Ecartype	17,7	17,6
				Moyenne	25,8	26,7
				Coefficient de variation	68,4%	65,9%

Le tableau 3.3-b présente les résultats statistiques des variations des valeurs du tableau 3.3 - a. En moyenne les indices de la mesure M2 sont multipliés par 23,6 lors de l'utilisation de la modélisation réaliste du contact. Les indices de la mesure M5 subissent une plus forte augmentation, car ils sont en moyenne multipliés par 28,3 lors de l'utilisation de la modélisation réaliste du contact. Le coefficient de variation est l'écart type divisé par la valeur moyenne des variations. Le coefficient de variation des indices est grand pour les indices de M2 : 61,5% et de M5 : 59,1%. Les indices des mesures varient donc de manière

inégale suivant les préhensions entre la modélisation réaliste du contact et la modélisation uniforme.

3.2.3 Déplacement du centre du centre de masse des objets

Cette section présente l'étude de l'influence du positionnement du centre de masse de l'objet sur les valeurs des indices données par les mesures M2 et M5. Le tableau de la tableau 3.3 présente les indices obtenus en utilisant le centre géométrique comme point de référence puis en utilisant le centre de masse comme points de référence pour le calcul de M2 et M5.

Tableau 3.4 - Tableau de la différence entre des indices obtenus en utilisant le centre géométrique comme point de référence et en utilisant le centre de masse comme point de référence.

		Différence des indices	
Objet	Préhension	M2	M5
Tournevis électrique	Adaptée	0,012	0
	Peu adaptée	0,0017	0
	Inadaptée	0	0
Marteau	Adaptée	-0,066	0
	Peu adaptée	0,19	0
	Inadaptée	0	0

Pour le tournevis électrique, les indices de la mesure M2 varient très peu : 0,012 pour la préhension « adaptée » et inférieure à 0,01 pour la préhension « peu adaptée ». Pour le marteau, les indices de la mesure M2 varient de manière plus importante. Entre les calculs des indices de M2 en utilisant le centre géométrique et le centre de masse, l'indice pour la préhension « adaptée » diminue de 0,066 et celui de la préhension « peu adaptée » augmente de 0,19. La modification du placement du centre de masse a également influencé le classement des préhensions « adaptée » et « peu adaptée » du marteau pour la mesure M2.

Les indices de M5 n'ont pas été affectés par la variation du centre de masse du tournevis électrique et du marteau.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RESULTATS

4.1 Variation des indices en fonction des préhensions

Il est difficile de choisir la mesure de qualité de préhension à utiliser pour qualifier les préhensions humaines sur un objet. Les rares articles utilisant des mesures de qualité de préhension sur des préhensions humaines ont fait ressortir que la mesure M2 est la plus adaptée à mesurer la stabilité des préhensions. La mesure M5 a également été choisie, car elle utilise les mêmes principes physiques que la mesure M2 et permet de mesurer la capacité des préhensions à résister à des torseurs d'effort. Donc, dans cette étude, M2 est utilisée pour mesurer la stabilité de la préhension et M5 pour mesurer la capacité de la préhension à utiliser l'objet.

Pour mesurer des préhensions avec M2 et M5, il est nécessaire de choisir le nombre de facettes approximant les cônes de friction au point de contact. Aucun article de la littérature ne fait référence au nombre de facettes choisies pour approximer les cônes de friction lors de l'utilisation de la mesure M2. Des tests ont donc été réalisés afin d'observer l'évolution des indices de M2 en fonction du nombre de facettes utilisé pour approximer les cônes de friction. Nos résultats ont montré que la variation des indices est inférieure à 3% de leur valeur à partir de dix facettes par cône de friction. Cette variation est inférieure à 1% de la valeur des indices lorsque vingt facettes sont utilisées. La variation des indices tend à diminuer avec l'augmentation du nombre de facettes approximant le cône de friction. En effet, on peut assimiler le cône friction avec une pyramide ayant un nombre infini de côtés. Ainsi, plus le nombre de facettes augmente, plus la pyramide se rapproche de la forme du cône et moins les indices varient.

La variation des indices en fonction des préhensions a également été étudiée. Le calcul des mesures M2 et M5, réalisé dans un espace à six dimensions (trois pour les forces et trois pour les moments), rend difficile la prévision de la variation des indices des mesures en fonction

des préhensions. La littérature n'explique pas comment prévoir la variation des indices de M2 et M5 en fonction des préhensions sur des objets de formes complexes. Les indices des mesures M2 et M5 dépendent de la position des points de contact sur l'objet et de l'orientation des vecteurs normaux à ces points. Ainsi, pour analyser les résultats, des conjectures sont effectuées entre : les indices des mesures, les points d'application des forces et les directions des forces appliquées aux points de contact.

Pour la mesure M2, les indices obtenus lors des tests de la préhension « adaptée » et « peu adaptée » du marteau varient peu contrairement aux importantes variations constatées pour tous les autres tests.

Pour expliquer la proximité de ces mesures, il nécessaire comprendre le mode de calcul de la mesure M2. M2, lors de son calcul, cherche le point faible de la préhension. C'est-à-dire que M2 cherche le torseur auquel la préhension peut le moins résister, puis elle calcule sa norme. Ainsi, pour avoir un indice élevé avec la mesure M2, il est nécessaire d'avoir des efforts appliqués par la main sur l'objet qui couvre le plus de directions possible. Plus les efforts appliqués par la main sur l'objet ont des directions différentes, plus la préhension pourra résister à des efforts externes différents et plus l'indice de M2 sera élevé.

Pour les préhensions « adaptée » et « peu adaptée » du marteau, les efforts appliqués par la main sur l'objet le sont suivant différentes directions. Pour ces deux préhensions, les indices de M2, très proches, montrent que ces deux préhensions ont une dispersion des forces qui est similaire. La mesure M2 estime que les deux préhensions pourront résister, dans le pire des cas, à des torseurs ayant une norme similaire. Ainsi, selon M2, les préhensions « adaptée » et « peu adaptée » du marteau ont une stabilité similaire bien que leurs efforts aux points de contact et la position des points de contact soient différentes.

Pour la mesure M5, les indices varient de manière importante excepté pour les préhensions du tournevis. M5 mesure la capacité des préhensions à résister à un effort connu. Dans le cas du tournevis, l'effort externe aux préhensions se situe suivant l'axe du tournevis. Le schéma

si dessous montre la répartition des directions des forces aux points de contact de la préhension « peu adaptée » du tournevis.

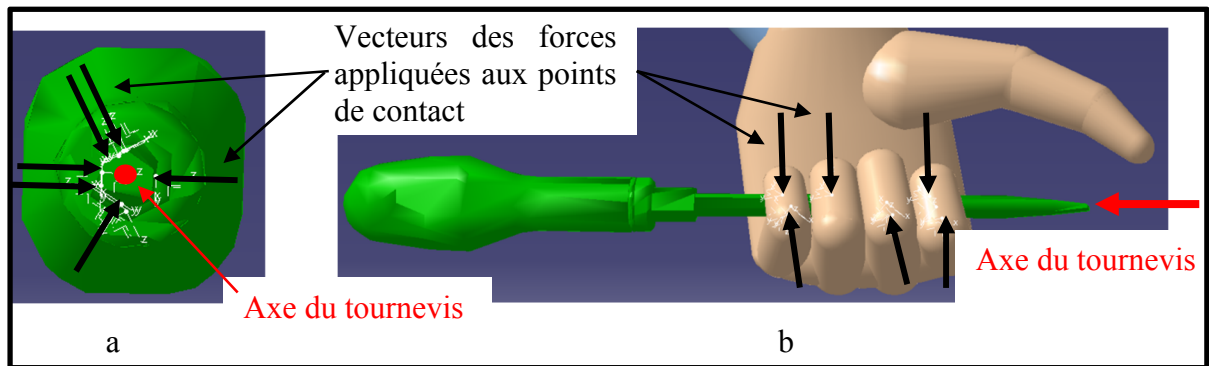


Figure 4.1 – a – Vue de face de la préhension « peu adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d’efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d’efforts appliqués

Sur la figure 4.1, les directions des forces appliquées par la main sur le tournevis sont visibles. Pour les préhensions « peu adaptée » et « inadaptée » du tournevis, les préhensions sont faites sur la tige du tournevis. Les directions des forces normales aux points de contact de ces deux préhensions sont donc limitées par les côtés plats de la tige du tournevis. Il est donc normal que ces deux préhensions aient des indices similaires pour M5. La préhension « adaptée » du tournevis se fait sur le manche du tournevis. Ce manche à une forme plus arrondie que la tige du tournevis. Les forces appliquées par la main sur le manche ont donc des directions plus éparées que les forces appliquées sur la tige du tournevis (figure 4.2). Il est donc logique que la préhension « adaptée » du tournevis ait un indice légèrement supérieur aux autres préhensions.

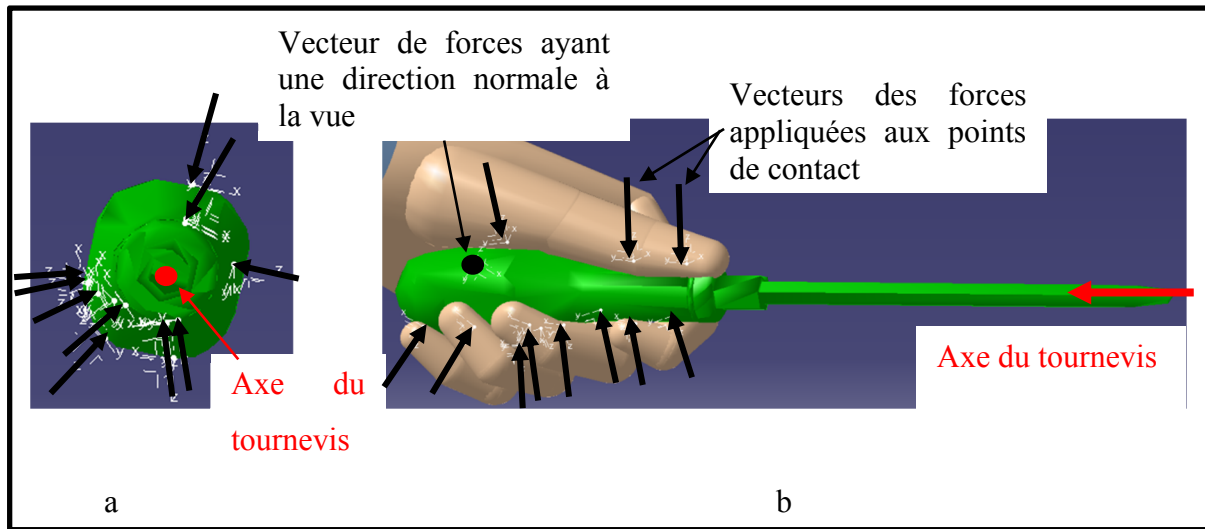


Figure 4.2 - a – Vue de face de la préhension « adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « adaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact.

Pour la mesure M2, les préhensions ont toutes été classées comment attendues. Pour la mesure M5, les préhensions « adaptée » et « peu adaptée » du tournevis électrique et du marteau ont été inversées par rapport aux résultats attendus, c'est-à-dire : indice préhension « adaptée » > indice préhension « peu adaptée ». Pour comprendre pourquoi ces deux préhensions ont été inversées il nécessaire d'observer la position des points de contact et la direction des vecteurs normaux aux points de contact.

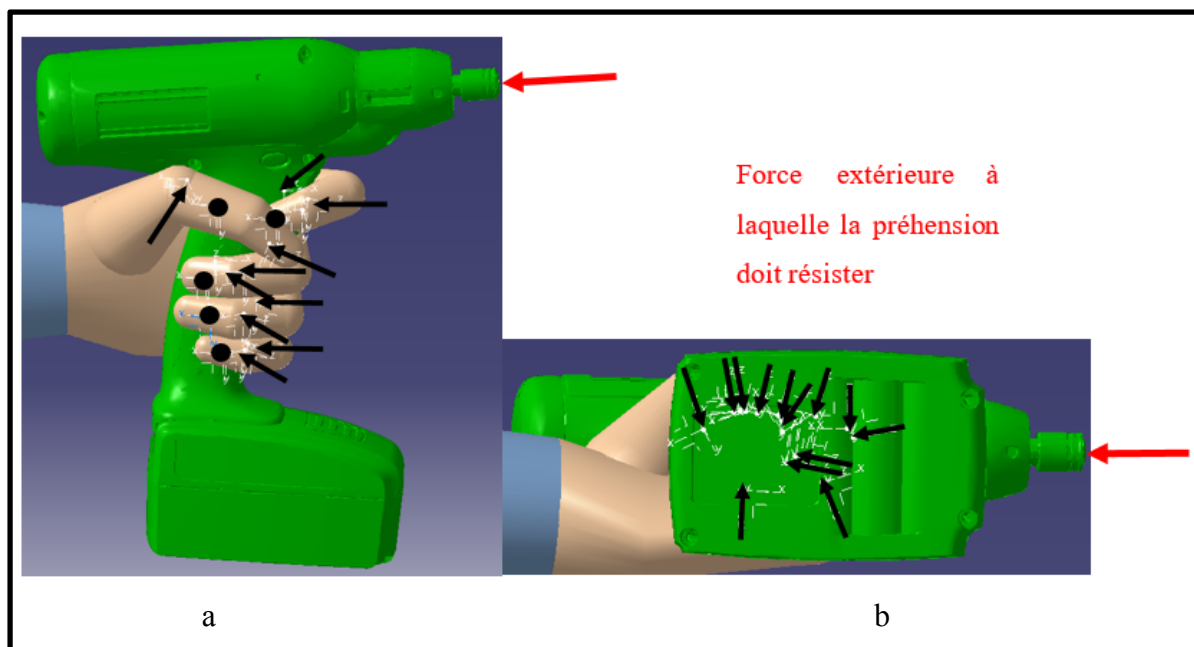


Figure 4.3 - a – Vue de côté de la préhension « adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de dessous de la préhension « adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'effort

Les préhensions « adaptées » du tournevis électrique et du marteau sont très similaires. Les préhensions « peu adaptées » de ses deux outils le sont également.

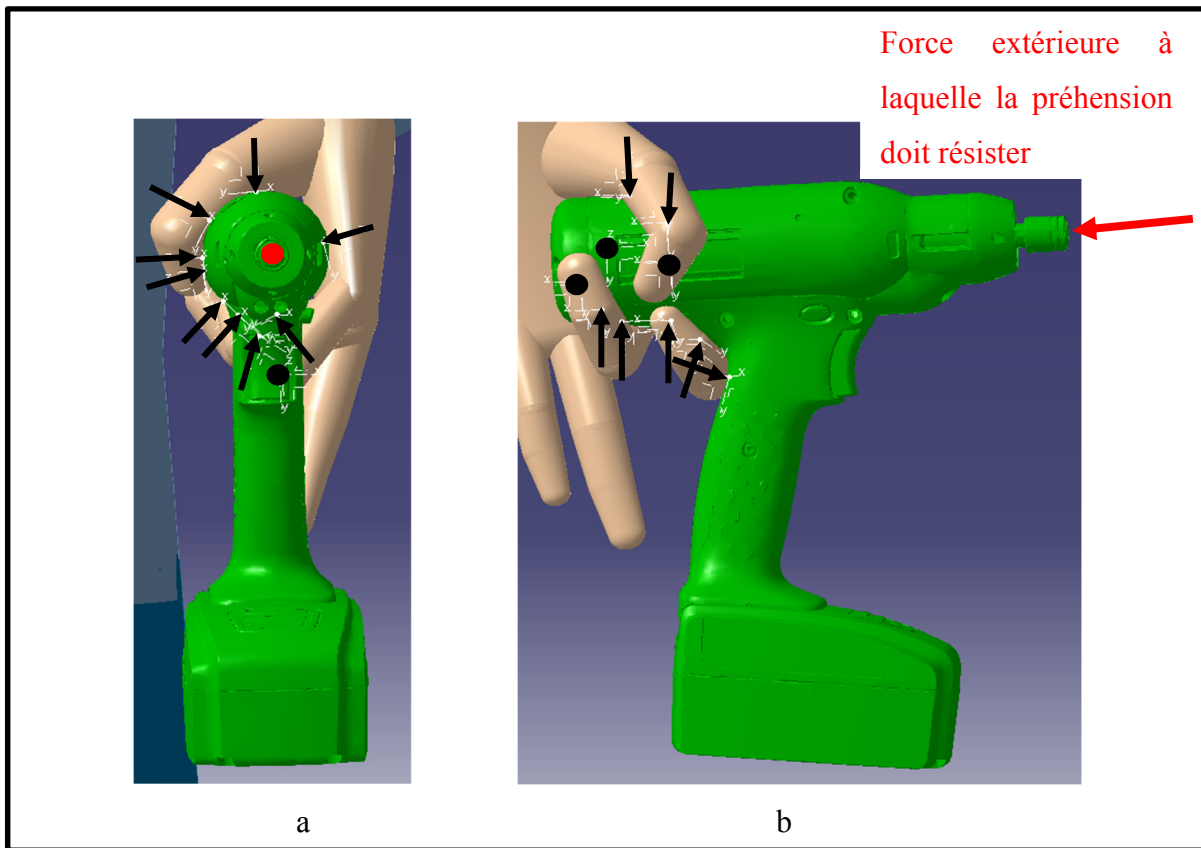


Figure 4.4 - a – Vue de face de la préhension « peu adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du tournevis électrique avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact

Étant donnée la répartition des directions des vecteurs normaux aux points de contact, les préhensions de ces quatre objets peuvent être approximées par des préhensions sur un cylindre.

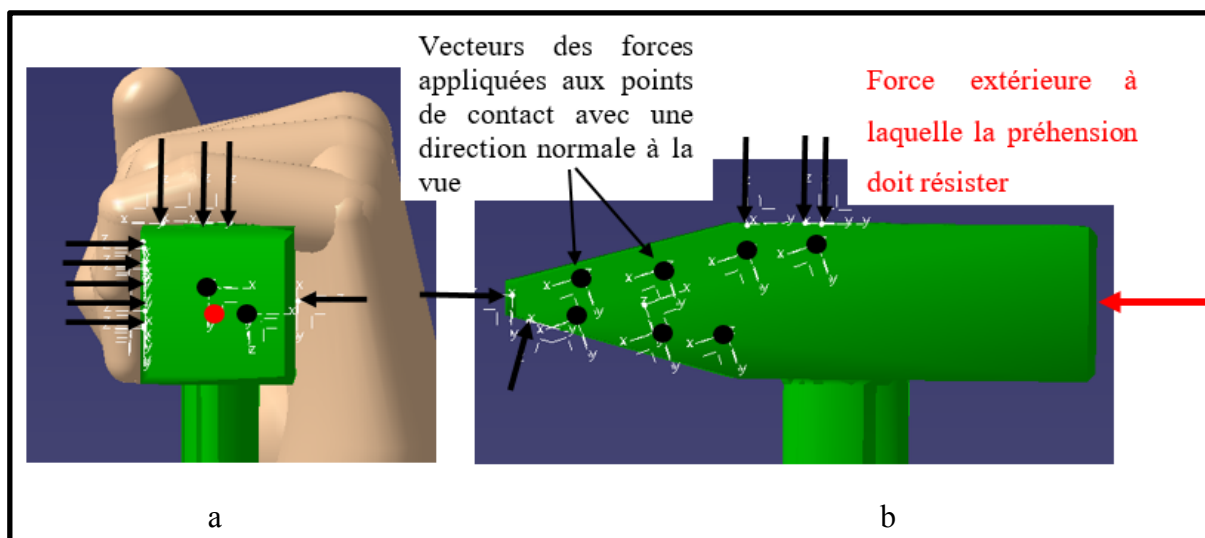


Figure 4.5 - a – Vue de face de la préhension « peu adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact

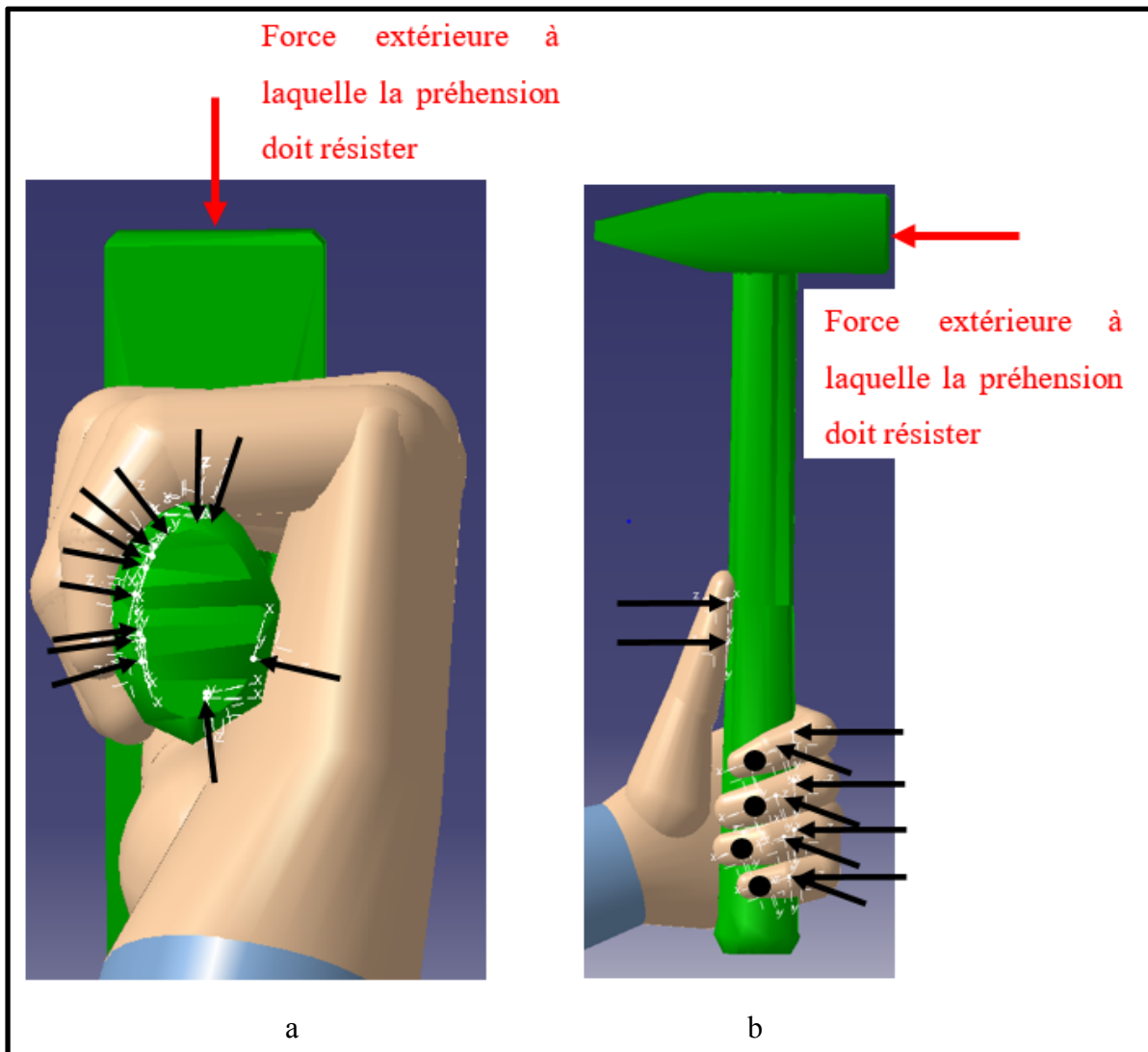


Figure 4.6 - a – Vue de dessous de la préhension « adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « peu adaptée » du marteau avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact

Les préhensions « adaptées » du marteau et du tournevis électrique peuvent être approximées par des prises sur un cylindre devant résister à un effort externe appliqué sur un côté du cylindre (Figure 4.7 – a). Les préhensions « peu adaptées » du marteau et du tournevis électrique peuvent être approximées par des prises sur un cylindre devant résister à un effort externe appliqué suivant l'axe du cylindre (Figure 4.7 – b).

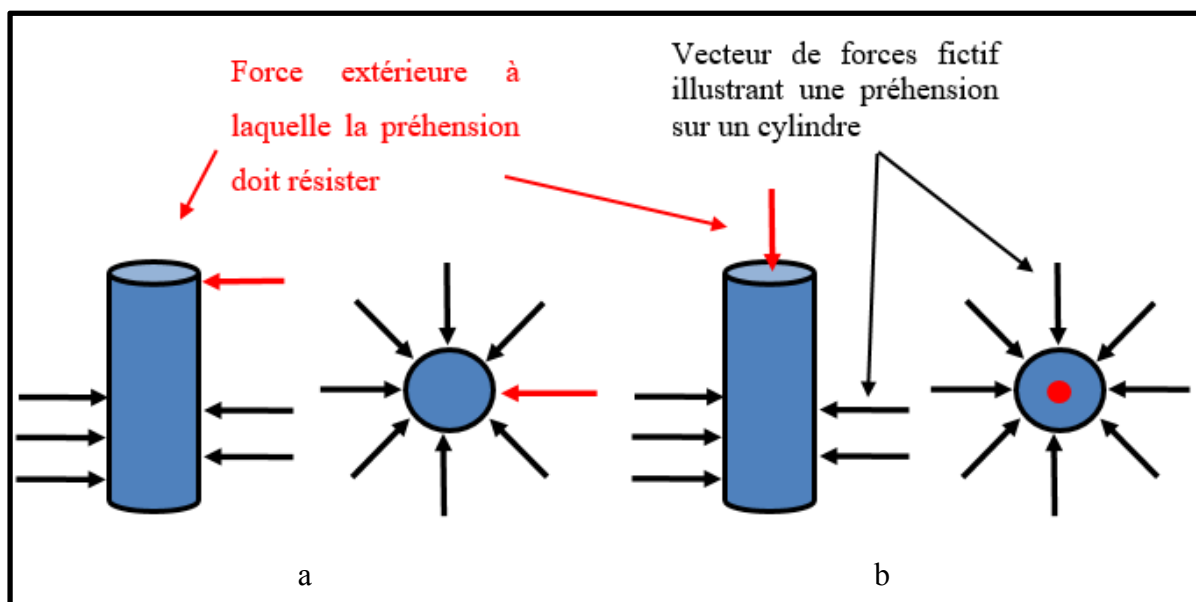


Figure 4.7 – a – simplifications des préhensions par des préhensions sur un cylindre pour les préhensions « adaptées » du tournevis et du marteau. b – simplification des préhensions par des préhensions sur un cylindre pour les préhensions « peu adaptées » du tournevis et du marteau

La mesure M5 classe les préhensions « peu adaptées » devant les préhensions « adaptées » pour le marteau et le tournevis électrique. Si on applique ce résultat à la simplification avec des cylindres, cela signifie qu'une préhension réalisée sur un cylindre résistera mieux à un effort suivant l'axe du cylindre qu'à un effort appliqué sur le côté du cylindre. Une explication possible de ce résultat est que le couple généré par l'effort externe sur le côté du cylindre est bien plus grand que le couple de l'effort externe suivant l'axe du cylindre. Intuitivement, un homme prend le marteau par le manche lorsqu'il veut planter un clou par exemple. La prise du marteau par le manche permet d'avoir une vitesse de la tête du marteau plus importante qu'une prise sur la tête du marteau. Cependant, dans la mesure M5 seules les forces statiques sont étudiées. D'un point de vue statique, il est plus facile de résister à un effort appliqué sur la tête du marteau si la préhension est réalisée sur la tête plutôt que sur le manche. Ce raisonnement s'applique également pour les préhensions « adaptée » et « peu adaptée » du tournevis électrique. Un autre paramètre pouvant expliquer le classement non conforme aux attentes est que l'effet de la pesanteur sur les objets n'est pas pris en la compte

lors de l'utilisation de M5. Lors de l'application de M5, seul l'effort d'utilisation de l'objet est pris en compte. Cela revient à prendre l'objet en pesanteur. Or le poids du marteau et du tournevis électrique est non négligeable, même lors de leur utilisation.

4.2 Variation des indices en fonction de paramètres physique

L'influence de plusieurs paramètres physiques sur les mesures de M2 et M5 a ensuite été étudiée.

4.2.1 Cônes de friction

Tout d'abord, l'influence du coefficient de friction aux points de contact sur les mesures M2 et M5 a été étudiée. Les résultats ont montré que les indices de M2 et M5 varient de manière presque linéaire en fonction du coefficient de friction pour des valeurs de coefficient de friction comprises entre 0.5 et 1.5. Cependant, la vitesse de variation des indices en fonction du coefficient de friction n'est pas identique suivant les préhensions. Il a été montré que les variations du coefficient de friction, en faisant varier les mesures, pouvaient modifier le classement des préhensions d'après les mesures. Les classements des mesures sont plus proches du classement attendu lorsqu'un coefficient de friction faible est utilisé que lorsqu'un coefficient de friction important est utilisé.

4.2.2 Forces normales d'une main humaine

Ensuite les mesures de qualité de préhensions ont été utilisées en prenant en compte les forces normales maximales réelles qu'une main humaine peut appliquer aux points de contact. Les résultats de ces tests ont montré une grande variation des indices des mesures de qualité de préhensions. L'utilisation d'une modélisation réaliste du contact a modifié le classement des préhensions « peu adaptée » et « inadaptée » du tournevis pour les M2 et M5. Ces deux préhensions avaient un classement qui était celui attendu lorsqu'une modélisation uniforme du contact était utilisée.

Les forces maximales mesurées par (Enders & Seo, 2011) sur des humains dans la réalité ont été utilisées lors de ces mesures. Les forces qui étaient originellement uniformes et normalisées sur toute la main, ont été multipliées par les mesures de (Enders & Seo, 2011). Cela a eu pour effet d'attribuer des poids aux différentes phalanges de la main. En effet, les phalanges de la main n'ont pas toutes les mêmes forces maximales applicables. Ainsi les phalanges du pouce ainsi que les phalanges distales de l'index et du majeur ont des forces maximales plus élevées que les autres phalanges. De plus, lors de l'implémentation des forces maximales par phalanges, nous avons attribué à la paume de la main une force maximale très grande qui est la somme des forces maximales des phalanges distales de l'index, du majeur, de l'annulaire et de l'auriculaire. Ainsi les préhensions utilisant les phalanges avec une force maximale plus élevée que la moyenne devraient subir une augmentation des indices de M2 et M5 plus élevés que les autres préhensions. Cependant la répartition de la direction des vecteurs normaux aux points de contact ainsi que la position des points de contact sont également importantes. Par exemple, si, lors d'une préhension, toutes les phalanges ayant une force maximale élevée pointent dans la même direction alors la préhension pourra résister à des efforts importants suivant cette direction, mais il existera des torseurs de normes faibles auxquels la préhension ne pourra pas résister.

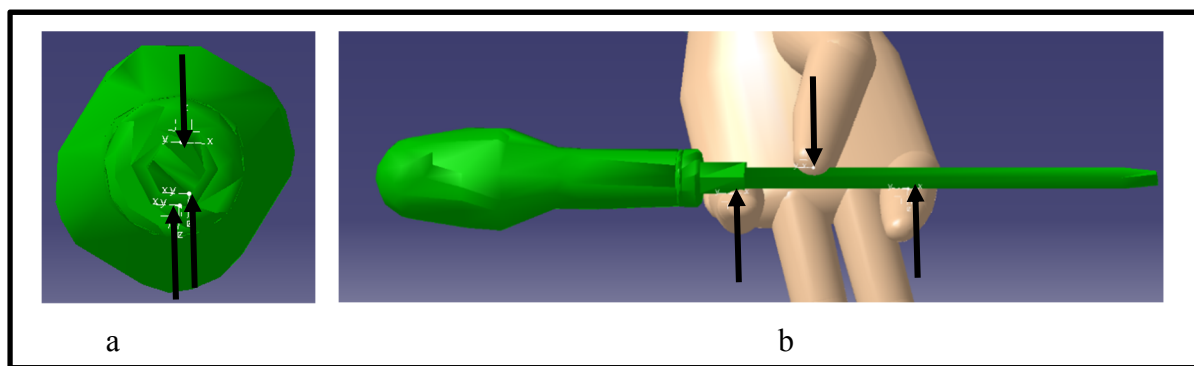


Figure 4.8 - a – Vue de face de la préhension « inadaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact. b - Vue de côté de la préhension « inadaptée » du tournevis avec les directions des vecteurs d'efforts appliqués aux points de contact

La figure 4.1 montre les directions des vecteurs normaux au point de contact pour la préhension « peu adaptée » du tournevis. La figure 4.8 montre également les directions des

vecteurs normaux au point de contact, mais pour la préhension « inadaptée » du tournevis. Les forces normales aux points de contact pour la préhension « peu adaptée » ont des directions plus éparées que pour la préhension « inadaptée ». La préhension « peu adaptée » a donc un indice plus élevé de M2 que la préhension « inadaptée » lorsqu'on utilise une modélisation uniforme du contact. Lors de l'application des forces maximales qu'une personne peut réellement appliquer, le classement des préhensions « inadaptée » et « peu adaptée » du tournevis a été inversé. Les indices de M2 pour ces deux préhensions ont augmenté mais l'indice de la préhension « inadaptée » a subi une augmentation plus importante que l'indice de la préhension « peu adaptée » du tournevis. Ces deux préhensions ont des phalanges en contact avec l'objet différentes. On pourrait expliquer ce changement de classement en passant que les phalanges en contact avec l'objet pour la préhension « inadaptée » ont des forces maximales applicables plus élevée que les phalanges en contact avec l'objet de la préhension « peu adaptée ». Cependant, c'est l'inverse qui est vrai, les phalanges en contact avec l'objet de la préhension « peu adaptée » ont en moyenne une force maximale applicable plus élevée que les phalanges en contact de la préhension « inadaptée ». Cette variation d'indice n'est pas évidente à expliquer étant donné l'état actuel de compréhension de la mesure M2.

4.2.3 Position du centre de masse

Finalement, l'influence de la position du centre de masse de l'objet sur les indices des mesures M2 et M5 a été étudiée sur les préhensions du marteau et du tournevis électrique. Les indices de la mesure M5 n'ont pas été affectés par le déplacement du centre de masse de ces deux objets. Cela signifie que la composante des moments du torseur n'influence pas les mesures de M5 sur ces préhensions. Cela implique que les composantes de moments générés par les forces extérieures à la préhension sont négligeables pour les préhensions du marteau et du tournevis électrique. Pour rappel, le moment généré par un effort sur un objet est le produit vectoriel entre le vecteur force et le vecteur de position entre le point d'application et le centre de masse de l'objet. Or pour que le moment appliqué par l'effort sur l'objet soit grand, il faut que la direction du vecteur d'effort et du vecteur de position soit la plus

différente possible. Or les efforts externes aux préhensions du marteau et du tournevis électrique ont une direction qui est presque la même que le vecteur entre la position du point d'application de l'effort et le centre de masse des objets (figure 4.4 et 4.6). Par conséquent les moments générés par les efforts externes à la préhension du marteau sont très faibles et le déplacement du centre de masse de l'objet n'a pas influencé les indices de M5.

Les indices de M2 ont été modifiés lors du déplacement du centre de masse. L'indice de M2 pour la préhension adaptée du marteau a diminué et l'indice de la préhension peu adaptée a augmenté. Ce résultat peut s'expliquer par la différence de moments générés par les préhensions lors du déplacement du centre de masse. Le centre de masse estimé est plus proche de la préhension peu adaptée que le centre géométrique. Les moments de la préhension sur l'objet ont donc diminué lors de l'utilisation du centre de masse de l'objet pour le calcul de M2. Il est donc logique que l'indice soit plus petit lorsque le centre de masse est utilisé plutôt que le centre géométrique. De même, le point de référence pour le calcul de la mesure M2 s'est éloigné de la préhension adaptée du marteau lors de l'utilisation du centre de masse de l'objet. Les moments générés par la préhension ont donc augmenté comparativement au calcul de l'indice avec l'utilisation du centre géométrique du marteau comme points de référence.

Cette hypothèse est juste pour les mesures de M2 sur les préhensions du marteau. Cependant, elle ne se vérifie pas avec les préhensions du tournevis électrique. Comme pour le marteau, le centre de masse de l'objet est plus proche de la préhension peu adaptée que le centre géométrique et le centre de masse est plus loin de la préhension adaptée que le centre de masse. Si on applique la logique expliquée dans le paragraphe précédent aux préhensions du tournevis, l'indice de la préhension peu adaptée aurait dû augmenter et l'indice de la préhension adaptée aurait dû diminuer lors de l'utilisation du centre de masse de l'objet comme points de référence. Or les résultats du tableau 3.3, montrent que les indices de la préhension peu adaptée et adaptée ont augmenté tous les deux.

CHAPITRE 5

DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Lors de nos tests, la majorité des préhensions ont été classées correctement par M2 et M5. Des hypothèses ont été avancées pour expliquer la variation des indices ainsi que les classements non conformes. Il serait intéressant de confirmer les hypothèses expliquant les résultats du classement des préhensions « adaptée » et « peu adaptée » du marteau et du tournevis. Pour cela des tests pourraient être réalisés en testant la résistance de préhensions sur un cylindre à des forces externes appliquées suivant l'axe de cylindre et sur les côtés du cylindre.

Une étude sur la variation des indices de M2 en fonction de la simplification du cône de friction par une pyramide a été menée. Les résultats ont montré qu'une approximation avec une pyramide à vingt côtés a une variation d'indices par rapport à la valeur précédente inférieure à 1%. Une étude sur le temps de calcul pourrait être menée afin de déterminer qu'elle est le meilleur compromis entre le temps de calcul de la mesure M2 et la précision de ces mesures.

La variation des coefficients de friction a montré l'influence que pouvait avoir ce paramètre sur le classement des préhensions. Pour de futur de travaux, il serait préférable d'utiliser un coefficient de friction de 0,5. (Derler & Gerhardt, 2012) ont montré dans leur article que le coefficient de friction de la peau de la main tend vers 0,5 lorsqu'on augmente la pression exercée sur celle-ci. La méthodologie de calcul de M2 et M5 considérant les forces maximales aux points de contact, il est cohérent de choisir le coefficient de friction de la peau de la main lorsqu'une grande pression y est appliquée.

Les forces maximales par phalanges ont modifié le classement des préhensions « peu adaptée » et « inadaptée » du tournevis. Les forces maximales par phalange utilisées pour M2 et M5 sont celles mesurées par (Enders & Seo, 2011). Appliquer des forces maximales par

phalanges différentes revient à privilégier les phalanges les plus fortes de la main lors des mesures des préhensions par M2 et M5. Utiliser les forces maximales qu'un homme peut réellement appliquer permet d'avoir une modélisation des forces plus proche de la réalité et devrait permettre d'avoir un classement des préhensions conforme aux attentes. Cependant le choix de la force maximale de la paume de la main est à revoir. Dans cette étude, la paume de la main avait une force maximale qui était égale à la somme des forces maximales des phalanges distales des autres doigts. Ainsi, la paume de la main avait une force maximale disproportionnée par rapport aux autres segments de la main. La taille du segment de la paume de la main était également plus grande que les autres segments de la main. Dans de futurs travaux, il serait judicieux de séparer la paume en plusieurs segments de taille comparable aux autres phalanges et de leur attribuer une force maximale applicable identique.

La modification de la position du centre de masse de l'objet a eu une influence sur le classement des indices de la mesure M2. (Máximo A. Roa, 2014) décrivent dans leur article que la position du centre de masse de l'objet a une influence sur la mesure, car elle modifie le calcul des moments appliqués par la main sur l'objet. Utiliser le centre de masse l'objet comme points de référence pour les calculs de M2 et M5 est cohérent avec la cinématique de l'objet, mais la position du centre de masse de l'objet n'est pas toujours connue. (Máximo A. Roa, 2014) propose d'utiliser comme points de référence le centroïde des points de contact entre la main et l'objet. Cette approche apporte une solution au positionnement du centre de masse de l'objet, mais ne permet plus de prendre en compte la position des points de contact par rapport à l'objet. Or selon la distance entre les points de contact avec le centre de masse de l'objet, un moment plus ou moins grand va être appliqué par la main sur l'objet. L'exemple de la clé anglaise illustre bien cette notion. Plus la préhension sur la clé anglaise est loin du centre de masse, plus il est possible d'appliquer un couple important.

Pour les mesures M2 et M5, il existe une différence de facteur de proportionnalité entre les composantes de forces et de moments des torseurs. Les moments étant homogènes à des forces multipliées par une distance, la différence d'échelle entre les forces et les moments

peut entraîner la non-prise en compte de la composante de force ou de moment du torseur lors des mesures. Pour remédier à cela (Máximo A. Roa, 2014) propose de multiplier les composantes de forces des torseurs par un coefficient ρ qui est la distance moyenne des points de contact avec le point de référence (ici le centre de masse).

CONCLUSION

Les mesures de qualité de préhensions ont été très peu étudiées sur des préhensions humaines dans la littérature. Aucun article de la littérature n'essaie de comprendre la variation des indices en fonction des préhensions ou des paramètres physiques pouvant influencer les mesures. Ce mémoire se concentre sur ces éléments.

Cette recherche s'est centrée sur des préhensions humaines réalisées sur des objets couramment utilisés dans l'industrie. Deux mesures ont été choisies pour quantifier la capacité des préhensions à porter les objets et à les utiliser. Les préhensions testées ont été réalisées par le mannequin virtuel de DELMIA sur le logiciel CATIA V5 de Dassault Systèmes.

Une étude a été menée sur la variation des indices en fonction de la simplification des cônes de friction aux points de contact. La variation des indices en fonction des préhensions a également été étudiée. Le classement des préhensions par les mesures de qualité de préhensions a été comparé au classement des préhensions par un humain. Les résultats obtenus lors des tests ont montré que les deux mesures pouvaient classer les préhensions telles qu'une personne l'aurait fait. Les classements non conformes aux attentes ainsi que la variation des indices ont été expliqués par des hypothèses qui doivent encore être vérifiées.

La variation des indices des mesures en fonction de différents paramètres physiques a également été étudiée. Plusieurs paramètres ont été modifiés : le coefficient de frottement du cône de friction, les forces maximales par phalange et la position du point de référence pour les calculs des mesures. Les classements des préhensions par les mesures sont conformes aux attentes pour la plupart des préhensions. Pour les classements non conformes, des hypothèses pouvant expliquer les limites des mesures de qualité ont été avancées.

La mesure M5 (Task oriented measure) pourrait faire l'objet de futurs travaux afin de mieux comprendre les indices qu'elle retourne. L'utilisation de M5 sur des préhensions sur un

cylindre avec des efforts externes appliqués suivant l'axe du cylindre et suivant les côtés pourrait expliquer le classement non conforme aux attentes des préhensions adaptée et peu adaptée du marteau et du tournevis électrique. Lors de l'utilisation de la mesure M5, il serait également intéressant de prendre en compte la force exercée par le poids de l'objet sur la préhension lors de la mesure. Une segmentation de la paume de la main en plus petite partie permettrait de mieux modéliser le contact entre la paume de la main et les objets.

Pour de futurs tests, il est recommandé d'utiliser un coefficient de friction 0,5 aux points de contact ainsi que les forces maximales réelles par phalanges qu'un humain peut appliquer avec sa main mesurée par (Enders & Seo, 2011).

ANNEXE I

Outils sélectionnés par les experts du logiciel Delmia

Tableau A 1 - Liste d'objets couramment utilisés dans l'industrie pour assembler des pièces

Numéro	Nom	Image
1	Pinces	
2	Pinces-étau blocable	
3	Petit tournevis à fente	
4	Tournevis à fente	
5	Tournevis électrique	
6	Scie circulaire	
7	Marteau	
8	Petite clé anglaise	
9	Grande clé anglaise	
10	Clé ajustable	
11	clé Allen	
12	Perceuse	
13	Meuleuse d'angle	

ANNEXE II

Résultats des tests

Tableau A 2 – Tableau des indices de M2 en fonction du nombre de facettes utilisé pour approximer les cônes de friction

[illegible]

Tableau A 3 – Tableau de la variation des indices de M2 en fonction du nombre de facettes utilisé pour approximer les cônes de friction

[illegible]

Tableau A 5 – Tableau des valeurs des coefficients a et b des équations linéaires $ax + b$ approximant les courbes des indices de M2 et M5 en fonction du coefficient de friction et coefficient de corrélation entre les équations linéaires et les courbes.

		Coefficients des equation linéaire : ax + b					
		M2		M5		Coefficient de corrélation	
Object	Prehension	a	b	a	b	M2	M5
Pinces	Adaptée	0,98	-0,10	0,37	0,023	1,00000	0,99883
	Peu adaptée	0,41	-0,026	0,29	-0,020	0,99997	0,99973
	Inadaptée	0,026	-0,011	0,011	-0,0046	0,99995	0,99996
Tournevis	Adaptée	0,48	0,26	1,01	0,10	0,99578	0,99998
	Peu adaptée	0,12	0,14	0,99	0,006	0,99512	0,99997
	Inadaptée	0,12	0,043	0,97	-0,027	0,99134	0,99999
Tournevis électrique	Adaptée	0,70	0,075	0,33	0,17	0,99129	0,99954
	Peu adaptée	0,27	-0,029	1,0	-0,010	0,99975	1,00000
	Inadaptée	0	0	0	0	0	0
Marteau	Adaptée	0,11	0,082	0,066	0,061	1	1
	Peu adaptée	0,14	0,044	1,0	-0,0012	0,99997	1,00000
	Inadaptée	0	0	0	0	0,00000	0,00000
Clé anglaise	Adaptée	0,26	0,23	16,5	30,3	0,94727	0,99404
	Peu adaptée	0,30	-0,07	6,5	3,8	0,97286	0,99947
	Inadaptée	0	0	0	0	0	0

Tableau A 6 - Tableau des indices obtenus en utilisant le centre géométrique comme point de référence puis en utilisant le centre de masse comme point de référence.

		Indices des mesures			
		Centre géométrique		Centre de masse	
Objet	Préhension	M2	M5	M2	M5
Tournevis électrique	Adaptée	0,79	0,49	0,81	0,49
	Peu adaptée	0,24	0,99	0,24	0,99
	Inadaptée	0	0	0	0
Marteau	Adaptée	0,19	0,13	0,13	0,13
	Peu adaptée	0,18	0,99	0,37	0,99
	Inadaptée	0	0	0	0

BIBLIOGRAPHIE

- Derler, S., & Gerhardt, L.-C. (2012). Tribology of skin: review and analysis of experimental results for the friction coefficient of human skin. *Tribology Letters*, 45(1), 1-27.
- Enders, L. R., & Seo, N. J. (2011). Phalanx force magnitude and trajectory deviation increased during power grip with an increased coefficient of friction at the hand-object interface. *Journal of Biomechanics*, 44(8), 1447-1453.
- Endo, Y., Kanai, S., Kishinami, T., Miyata, N., Kouchi, M., & Mochimaru, M. (2007a). Virtual grasping assessment using 3D digital hand model. Dans *10th Annual Applied Ergonomics Conference: Celebrating the Past - Shaping the Future, March 12, 2007 - March 15, 2007* (pp. ergoGENESIS; Humantech; Idea@Work; NeutralPosture; Standers Choice Health Mats). Institute of Industrial Engineers.
- Endo, Y., Kanai, S., Kishinami, T., Miyata, N., Kouchi, M., & Mochimaru, M. (2007b). Virtual grasping assessment using 3D digital hand model. Dans *Annual Applied Ergonomics Conference: Celebrating the Past-Shaping the Future*.
- Feix, T., Romero, J., Schmiedmayer, H.-B., Dollar, A. M., & Kragic, D. (2016). The grasp taxonomy of human grasp types. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(1), 66-77.
- Ferrari, C., & Canny, J. (1992). Planning optimal grasps. Dans *1992 IEEE International Conference on Robotics And Automation, 12-14 May 1992* (pp. 2290-2295). IEEE Comput. Soc. Press. doi: 10.1109/ROBOT.1992.219918. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1992.219918>
- Goussous, F. (2007). *Grasp planning for digital humans* (Thesis, University of Iowa).
- Leon, B., Sancho-Bru, J. L., Jarque-Bou, N. J., Morales, A., & Roa, M. A. (2012). Evaluation of Human Prehension Using Grasp Quality Measures. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9. doi: 10.5772/51907. Repéré à <Go to ISI>://WOS:000309962800001
- Liegeois. (1977). Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7(12), 868-871. doi: 10.1109/TSMC.1977.4309644
- Máximo A. Roa, R. S. (2014). Grasp quality measures: review and performance. *Auton Robot*, 88, 38:65.
- Prattichizzo, D., & Trinkle, J. C. (2016). Grasping. Dans B. Siciliano & O. Khatib (Éds.), *Springer Handbook of Robotics* (pp. 955-988). Cham: Springer International

Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1_38. Repéré à
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_38

Roa, M. A., Koiva, R., & Castellini, C. (2012). Experimental evaluation of human grasps using a sensorized object. Dans *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2012)*, 24-27 June 2012 (pp. 1662-1668). IEEE. doi: 10.1109/BioRob.2012.6290670

Roa, M. A., & Suarez, R. (2015). Grasp quality measures: review and performance. *Autonomous Robots*, 38(1), 65-88. doi: 10.1007/s10514-014-9402-3. Repéré à <Go to ISI>://WOS:000347692000005
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4457357/pdf/10514_2014_Article_9402.pdf

